

PERANCANGAN PENGENDALI KECEPATAN MOTOR BLDC MENGGUNAKAN KENDALI *HYBRID MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL (MRAC) – FUZZY*

TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi



Oleh :

AKBAR DIMANSYAH HARAHAHAP
11655103834

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI**

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU

PEKANBARU

2021

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



LEMBAR PERSETUJUAN

PERANCANGAN PENGENDALI KECEPATAN MOTOR *BRUSHLESS* DC MENGUNAKAN KENDALI *HYBRID MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL* (MRAC) – *FUZZY*

TUGAS AKHIR

oleh:

AKBAR DIMANSYAH HARAHAHAP

11655103834

Telah diperiksa dan disetujui sebagai laporan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro
di Pekanbaru, pada tanggal 07 Juli 2021

Ketua Program Studi

Teknik Elektro

Digitally
signed by
Ewi
Ismaredah
Tanggal:
2021.07.19
13:52:03 WIB

Ewi Ismaredah S.Kom.,M.Kom

NIP. 19750922 200912 2 002

Pembimbing I

Digitally
signed
by Halim
Mudia

Halim Mudia, ST.,MT

NIK. 130 517 053



LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN PENGENDALI KECEPATAN MOTOR *BRUSHLESS DC* MENGUNAKAN KENDALI *HYBRID MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL* (MRAC) – *FUZZY*

TUGAS AKHIR

oleh:

AKBAR DIMANSYAH HARAHAP

11655103834

Telah dipertahankan di depan Sidang Dewan Penguji
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
di Pekanbaru, pada tanggal 07 Juli 2021

Pekanbaru, 07 Juli 2021

Mengesahkan,



Dr. Hartono, M.Pd.

NIP. 19640301 199203 1 003

Ketua Program Studi

Teknik Elektro

Digitally
signed by Ewi
Ismaredah
Tanggal:
2021.07.19
13:52:50 WIB

Ewi Ismaredah S.Kom.,M.Kom

NIP. 19750922 200912 2 002

DEWAN PENGUJI :

Ketua : Rika Susanti, ST.,M.Eng

Sekretaris : Halim Mudia, ST.,MT

Anggota I : Jufrizel, ST.,MT

Anggota II : Aulia Ullah,ST.,M.Eng

Digitally
signed by
Halim Mudia

Digitally
signed by
Aulia Ullah

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL

Tugas akhir yang tidak diterbitkan ini terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau adalah terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta pada penulis. Referensi kepustakaan di perkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau ringkasan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai dengan kebiasaan ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

Penggandaan atau penerbitan sebagian atau seluruh Tugas Akhir ini harus memperoleh izin dari Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau. Perpustakaan yang meminjamkan Tugas Akhir ini untuk anggotanya diharapkan untuk mengisi nama, tanda peminjaman dan tanggal pinjam.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

UIN SUSKA RIAU



LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa di dalam Tugas Akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan oleh saya maupun orang lain untuk keperluan lain, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak memuat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali disebutkan dalam referensi dan di dalam daftar pustaka.

Saya bersedia menerima sanksi jika pernyataan ini tidak sesuai dengan yang sebenarnya.

Pekanbaru, 07 Juli 2021
Yang membuat pernyataan,

AKBAR DIMANSYAH HARAHAH
NIM. 11655103834

UIN SUSKA RIAU

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



HALAMAN PERSEMBAHAN



Dengan menyebut nama Allah yang maha pengasih lagi maha penyayang

Menuntut ilmu adalah kewajiban bagi setiap muslim, Nabi Muhammad SAW telah meneladani dari segala keteladan. Izinkan hamba-Mu untuk menjadi pengikut setia, yang senantiasa menyerukan nama-Mu dan ayat-Mu, yang senantiasa meneladani perilaku utusan-Mu. Sehingga hamba-Mu bisa menyampaikan kebenaran agama yang dibawa utusan-Mu.

Katakanlah (Muhammad), “*Sesungguhnya salatku, ibadahku, hidupku dan matiku hanyalah untuk Allah, Tuhan seluruh alam, (QS. Al-An'am: 162)*

Allah senantiasa mengasihi hamba Nya, tidak akan diberikan ujian jika hamba Nya tidak sanggup melewatinya. Usaha tidak akan menkhianati hasil walaupun banyak rintangan suatu saat pasti akan ada jalan, begitulah perjalanan perkuliahanku hingga aku mencapai kedepan pintu gerbang sarjana. Ini semua tidak akan terjadi kalau Allah tidak mengizinkan, maka semua rasa syukur ini kupersembahkan kepadamu ya Rabb.

Allah tidak akan membebani seseorang melainkan sesuai dengan kadar kesanggupannya”. (QS. Al Baqarah : 286)

Ku persembahkan karya ini untuk kedua orang tuaku yaitu Ayahanda dan ibunda tercinta sosok pejuang dan semangat dalam hidupku yang tak pernah mengenal kata lelah apalagi mengeluh serta abang dan Adik tercinta, seluruh keluarga serta sahabat dan seluruh keluarga besar teknik elektro UIN SUSKA RIAU yang doanya senantiasa mengiringi setiap derap langkahku dalam meniti kesuksesan.

Niscaya Allah akan mengangkat (derajat) orang-orang yang beriman diantaramu dan orang-orang yang diberi ilmu beberapa derajat. (QS : Al-Mujadilah 11)

| Akbar Dimansyah Harahap |

|07 Juli 2021 |

PERANCANGAN PENGENDALI KECEPATAN MOTOR BLDC DENGAN KENDALI HYBRID MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL (MRAC) – FUZZY

AKBAR DIMANYAH HARAHAP

NIM : 11655103834

Tanggal Sidang : 07 Juli 2021

Program Studi Teknik Elektro Teknik Elektro
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
Jl. Soebrantas No. 155 Pekanbaru

ABSTRAK

Motor *Brushless* DC adalah motor arus searah tanpa sikat yang memiliki efisiensi tinggi, kecepatan yang tinggi dan dapat divariasikan dengan biaya perawatan yang rendah serta rendahnya tingkat *snoring/electrical noise*. Motor *Brushless* DC memiliki parameter yang dapat dikendalikan diantaranya kecepatan dan posisi. Untuk itu dibutuhkanlah suatu kendali adaptif yang dapat mengatur parameter sehingga keluaran kecepatan motor *Brushless* DC optimal, sistem kontrol adaptif parameter dapat bervariasi dan menyesuaikan apabila ada perubahan kondisi atau gangguan serta efisiensi yang sangat baik. Salah satunya ialah pengendali MRAC namun masih memiliki *overshoot* yang cukup besar. Maka ditambahkan pengendali *Fuzzy* pada MRAC untuk mengendalikan kecepatan sistem motor *Brushless* DC yang menghasilkan performansi yang baik, mampu mengikuti model referensi dari pengendali MRAC dan *set point* yang diinginkan, dengan waktu tnak 0.0439 detik dan *overshoot* yang mengecil menjadi 0,15%. Saat sistem diberi gangguan sebesar 10% pada detik ke 0.3 respons pengendali mampu untuk stabil pada waktu 0.3015 detik

Kata Kunci : Motor *Brushless* DC , MRAC, MIT Rule, *Fuzzy*.

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DESIGN OF BRUSHLESS DC SPEED CONTROL USING HYBRID MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL (MRAC) - FUZZY

AKBAR DIMANSYAH HARAHAH
STUDENT NUMBER : 11655103834

Date of Final Exam : July 07, 2021

*Department of Electrical Engineering
Faculty of Science of Technology
State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau
Soebrantas St. Number. 155 Pekanbaru - Indonesia*

ABSTRACT

The brushless DC motor is a brushless direct current motor that has high efficiency, high speed and can be varied with low maintenance costs and low levels of snoring/electrical noise. motors BLDC have controllable parameters including speed and position. For that we need an adaptive control that can adjust the parameters so that the output speed of the motor is brushless DC optimal, the adaptive control system parameters can vary and adjust if there are changes in conditions or disturbances as well as excellent efficiency. One of them is the MRAC controller but it still has overshoot a fairly large. Then a controller is added Fuzzy to the MRAC to control the speed of the motor system brushless DC which produces good performance, able to follow the reference model of the MRAC controller and the desired set point, with a steady time of 0.0439 seconds and overshoot a reduced to 0.15%. When the system is disturbed by 10% at 0.3 seconds, the controller response is able to stabilize at 0.3015 seconds

Keywords : Brushless DC Motors, MRAC, MIT Rule, Fuzzy.

UIN SUSKA RIAU

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr.Wb

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT, yang telah mencurahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Shalawat dan salam juga penulis haturkan kepada baginda Rasulullah SAW, sebagai seorang sosok pemimpin dan suri tauladan bagi seluruh umat di dunia yang patut di contoh dan di teladani bagi kita semua. Atas ridho Allah SWT penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul **“Perancangan Pengendali Kecepatan Motor Brushless DC Dengan Pengendali Hybrid Model Reference Adaptive Control (MRAC) – Fuzzy”**.

Melalui proses bimbingan dan pengarahan yang disumbangkan oleh orang-orang yang berpengetahuan, dorongan, motivasi, dan juga do'a orang-orang yang ada disekeliling penulis sehingga penulisan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan penuh kesederhanaan. Sudah menjadi ketentuan bagi setiap Mahasiswa yang ingin menyelesaikan studinya pada perguruan tinggi UIN SUSKA Riau harus membuat karya ilmiah berupa Tugas Akhir guna mencapai gelar sarjana.

Oleh sebab itu sudah sewajarnya penulis menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Ayah, Mamak, Abang dan Adik-adik tercinta yang telah memberikan semangat, dukungan moril maupun materil dan doa kepada penulis serta keluarga besar penulis yang selalu mendoakan penulis.
2. Bapak Prof. Dr. Hairunas, M.Ag. selaku Rektor UIN SUSKA Riau beserta kepada seluruh staf dan jajarannya.
3. Bapak Dr. Hartono, M.Pd selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN SUSKA Riau beserta kepada seluruh Pembantu Dekan, Staf dan jajarannya.
4. Ibu Ewi Ismaredah, S.Kom.,M.Kom. selaku ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi UIN SUSKA Riau sekaligus dosen penguji satu tugas akhir ini.
5. Bapak Mulyono, ST.,MT selaku sekretaris jurusan Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi UIN SUSKA Riau.



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.
6. Bapak Halim Mudia, ST.,MT selaku dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu serta pemikirannya dengan ikhlas dalam memberikan penjelasan dan masukan yang sangat berguna sehingga penulis menjadi lebih mengerti dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
 7. Bapak Jufrizel, ST.,MT dan Bapak Aulia Ullah, ST.,M.Eng selaku dosen penguji yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi kritikan dan saran yang sangat membangun terhadap penulis.
 8. Ibu Susi Afriani, ST.,MT selaku Dosen Pembimbing Akademik selama perkuliahan penulis dari semester 1 hingga akhir semester.
 9. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan bimbingan dan curahan ilmu kepada penulis sehingga bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
 10. Fenny Syarisda ST, Muhammad Budiono ST, yang telah banyak memberikan informasi seputar Tugas Akhir sehingga penulis tidak terlalu bingung untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini
 11. Para Sahabat Ahmad Iqbal ST, Syafri Yandi ST, Rahmad Afandi ST, Shandi Resaval ST, Zana Azra, R.Reski Eka Putra ST, Dwiki Imannusa, Fajar Fadillah ST yang telah memberikan dukungan, dorongan dan motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
 12. Teman Terbaik (Shintya Putri Alfianov, M.Khairi Rozakky S.Ag, Ernilawati S.Ag, Rahmat Sudarman S.I.Kom, Novita Yuliazmar, Soni Dewantara yang telah memberikan dukungan, semangat, dan motivasi serta pengalaman hidup kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
 13. Organisasi Pramuka UIN Suska Riau, DKD Riau, HIMATE UIN Suska Riau, Riau Adventure Family (RAF), Tunas Sablon Riau, Komunitas Menyatu Dengan Alam (KMDA), KKN Desa Sukarjo Mesim yang telah memberikan dukungan, dorongan, dan motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
 14. Penggend'16, Instrumentasi 2016 serta teman-teman teknik elektro angkatan 2016 lainnya yang juga telah memberikan banyak dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini serta teman-teman penulis lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu dan memberi dorongan, motivasi dan sumbangan pemikiran dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Semoga bantuan yang telah diberikan baik moril maupun materil mendapat balasan pahala dari Allah SWT, dan sebuah harapan dari penulis semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan para pembaca semua pada umumnya.

Semua kekurangan hanya datang dari penulis dan kesempurnaan hanya milik Allah SWT, hal ini yang membuat penulis menyadari bahwa dalam pembuatan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan karena keterbatasan kemampuan, pengalaman, dan pengetahuan penulis. Untuk itu penulis mengharap kritik dan saran dari semua pihak yang bersifat positif dan membangun demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Pekanbaru, 07 Juli 2021

Penulis,

Akbar Dimansyah Harahap
NIM. 11655103834

UIN SUSKA RIAU



DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL	iv
LEMBAR PERNYATAAN.....	v
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR RUMUS.....	xviii
DAFTAR SINGKATAN	xix
DAFTAR LAMPIRAN.....	xx
BAB I PENDAHULUAN	I-1
1.1 Latar Belakang	I-1
1.2 Tujuan Penelitian	I-5
1.3 Batasan Masalah	I-1
1.4 Manfaat Penelitian	I-5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	II-1
2.1 Penelitian Terkait	II-1
2.2 Motor <i>Brushless</i> DC.....	II-2
2.2.1 Kontruksi Motor <i>Brushless</i> DC	II-4
2.2.2 Prinsip Kerja Motor <i>Brushless</i> DC.....	II-5
2.2.3 Model Matematika Motor <i>Brushless</i> DC.....	II-5
2.3 Identifikasi Sistem.....	II-11
2.3.1 Respons Transient Sistem Orde Dua[18]	II-11
2.4 Model Reference Adaptive Control (MRAC).....	II-13
2.4.1 MIT Rule	II-14
2.5 Logika <i>Fuzzy</i>	II-16



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2.5.1	Fuzzifikasi	II-17
2.5.2	Fungsi Keanggotaan	II-18
2.5.3	Aturan <i>Fuzzy</i>	II-19
2.5.4	Metode <i>Fuzzy</i> Mamdani	II-20
2.5.5	Defuzzifikasi	II-21
2.6	Pengendali MRAC- <i>Fuzzy</i>	II-22
2.7	Program Matlab.....	II-22
BAB III METODE PENELITIAN.....		III-1
3.1	Flow Chart Metode Penelitian	III-1
3.2	Pemodelan Motor BLDC	III-3
3.3	Validasi Model Matematis	III-5
3.4	Perancangan Pengendali MRAC.....	III-6
3.4.1	Membuat model Referensi.....	III-7
3.5	Perancangan Kendali <i>Fuzzy</i> Mamdani.....	III-10
3.5.1	Fuzzifikasi	III-10
3.5.2	Rule Base	III-11
3.5.3	Defuzzifikasi.....	III-12
3.6	Perancangan Pengendali MRAC - <i>Fuzzy</i>	III-15
3.7	Hasil Data Penelitian yang Akan Diambil	III-16
3.7.1	Grafik dari Setiap Pengujian Sistem.....	III-16
3.7.2	Respons Transient Sistem dari Setiap Pengujian	III-17
BAB IV HASIL DAN ANALISA		IV-1
4.1	Gambaran Umum Pengujian	IV-1
4.2	Analisa Pengujian Motor Brushless DC Secara Open Loop.....	IV-1
4.3	Analisa Pengujian Pengendali MRAC Dalam Pencapaian <i>Set Point</i> Pada Motor BLDC	IV-4
4.4	Analisa Pengujian Pengendali MRAC- <i>Fuzzy</i> Dalam Pencapaian <i>Set Point</i> Pada Motor BLDC	IV-7
4.5	Perbandingan Respons Sistem Menggunakan Pengendali MRAC dan Pengendali MRAC yang Dikombinasikan dengan Pengendali <i>Fuzzy</i> Dalam Pencapaian <i>Set Point</i> Pada Kecepatan Motor BLDC.....	IV-9
4.6	Pengujian Pengendali MRAC Dalam Pencapaian <i>Set Point</i> Pada Motor BLDC dengan Gangguan.....	IV-10



Pengujian Pengendali MRAC - <i>Fuzzy</i> Dalam Pencapaian <i>Set Point</i> Pada Motor BLDC dengan Gangguan	IV-11
--	-------

BAB V PENUTUP

Kesimpulan	V-1
------------------	-----

Saran.....	V-1
------------	-----

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau



UIN SUSKA RIAU

- 4.7 Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



DAFTAR GAMBAR

Gambar

Halaman

Gambar 2. 1	Penampang Motor Brushless DC.....	II-3
Gambar 2. 2	Sensor hall dan Encoder pada motor Brushless DC	II-4
Gambar 2. 3	Bentuk melintang Motor Brushless DC	II-4
Gambar 2. 4	Rangkaian motor listrik sederhana	II-6
Gambar 2. 5	Diagram Simetris Brushless DC	II-6
Gambar 2. 6	Respons Sistem Orde Dua	II-12
Gambar 2. 7	Tanggapan Fungsi Unit-Step untuk Variasi Rasio Peredaman	II-13
Gambar 2. 8	Blok diagram skema Model Reference Adaptive Control	II-14
Gambar 2. 9	Skema MRAC dengan Metode MIT Rule	II-15
Gambar 2. 10	Tahap perancangan sistem Fuzzy	II-17
Gambar 2. 11	Representasi <i>Linear</i> Naik	II-18
Gambar 2. 12	Representasi <i>Linear</i> Turun	II-18
Gambar 2. 13	Representasi Segitiga	II-19
Gambar 2. 14	Representasi Trapesium	II-19
Gambar 2. 15	Blok Diagram <i>Fuzzy Modified</i> MRAC	II-22
Gambar 2. 16	Tampilan Matlab.....	II-23
Gambar 3. 1	Diagram Alir Penelitian.....	III-1
Gambar 3. 2	Blok Diagram <i>Open Loop</i> Motor <i>Brushless</i> DC.....	III-5
Gambar 3. 3	Respons Motor <i>Brushless</i> DC <i>Open Loop</i> (Tanpa Pengendali)	III-5
Gambar 3. 4	Rangkaian <i>Simulink</i> Pengendali MRAC.....	III-8
Gambar 3. 5	Hasil Respons MRAC Pada Motor <i>Brushless</i> DC.....	III-9
Gambar 3. 6	<i>Viewer Surface</i> Pengendali Fuzzy.....	III-12
Gambar 3. 7	Fungsi Keanggotaan <i>Error</i>	III-14
Gambar 3. 8	Fungsi Keanggotaan <i>Derror</i>	III-14
Gambar 3. 9	Fungsi Keanggotaan <i>Output</i>	III-15
Gambar 3. 10	Rangkaian <i>Simulink</i> Pengendali MRAC – <i>Fuzzy</i>	III-15
Gambar 3. 11	Contoh Pengujian Secara Simulasi.....	III-16
Gambar 3. 12	Contoh Menjalankan Simulasi.....	III-16
Gambar 3. 13	Contoh Menampilkan Grafik Keluaran Sistem	III-17
Gambar 3. 14	Contoh Tampilan Grafik Pada <i>Scope</i>	III-17



Gambar 4. 1 Rangkain Simulink Motor <i>Brushless</i> DC secara <i>Open Loop</i>	IV-2
Gambar 4. 2 Hasil Respons Motor <i>Brushless</i> DC secara <i>Open Loop</i>	IV-2
Gambar 4. 3 Rangkaian <i>Simulink</i> Pengendali MRAC pada motor <i>Brushless</i> DC	IV-4
Gambar 4. 4 Hasil Respons Sistem Motor BLDC Menggunakan Pengendali MRAC	IV-5
Gambar 4. 5 Hasil Respons MRAC – <i>Fuzzy</i> pada Motor BLDC	IV-7
Gambar 4. 6 Hasil Respons MRAC pada Motor BLDC dengan gangguan 10%	IV-10
Gambar 4. 7 Hasil Respons MRAC– <i>Fuzzy</i> pada Motor BLDC dengan gangguan 10%	IV-11
Gambar 4. 8 Hasil Respons MRAC– <i>Fuzzy</i> pada Motor BLDC dengan gangguan 10% dan 5%	IV-11

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

© Hak Cipta dilindungi Undang-Undang UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

UIN SUSKA RIAU

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

- Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Parameter Motor <i>Brushless</i> DC.....	III-3
Tabel 3.2 Proses Penentuan Nilai <i>Gamma</i>	III-9
Tabel 3.3 <i>Rule Base Fuzzy</i>	III-12
Tabel 3.4 Proses menentukan lebar fungsi keanggotaan <i>e</i> , <i>De</i> , dan <i>u</i>	III-13
Tabel 3.5 Proses menentukan lebar fungsi keanggotaan <i>e</i> (+), <i>e</i> (-), <i>De</i> (+), <i>De</i> (-), <i>B</i> dan <i>K</i>	III-13
Tabel 4.1 Respons Waktu Sistem Motor BLDC secara <i>Open Loop</i>	IV-4
Tabel 4.2 Respons Waktu Sistem Motor BLDC menggunakan kendali MRAC	IV-6
Tabel 4.3 Respons Waktu Sistem Motor BLDC menggunakan kendali MRAC- <i>Fuzzy</i>	IV-9
Tabel 4.4 Perbandingan Hasil Respons Pengendali MRAC dengan Pengendali MRAC – <i>Fuzzy</i> pada Pencapaian <i>Set Point</i> Motor BLDC.....	IV-9

DAFTAR RUMUS

Rumus	Halaman
Rumus 2.1. Prinsip Kerja <i>Brushless</i> DC.....	II-5
Rumus 2.2. Model Matematika Motor <i>Brushless</i> DC	II-7
Rumus 2.3. Persamaan Hasil Model Matematis Motor <i>Brushless</i> DC.....	II-11
Rumus 2.4. Karakteristik Orde Dua <i>Model Reference</i>	II-16

DAFTAR SINGKATAN

- = *Direct Current*
- = Konstanta *Proposional*
- = Konstanta *Derivative*
- = *Proposional Band*
- = *Delay Time*
- = *Rise Time*
- = *Matrix Labaratory*
- = *Maximum overshoot*
- = *Brushless Direct Current*
- = *Linear Quadratic Regulator*
- = *Model Reference Adaptive Control*

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

Matlab

Mp

BLDC

LQR

MRAC

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR LAMPIRAN

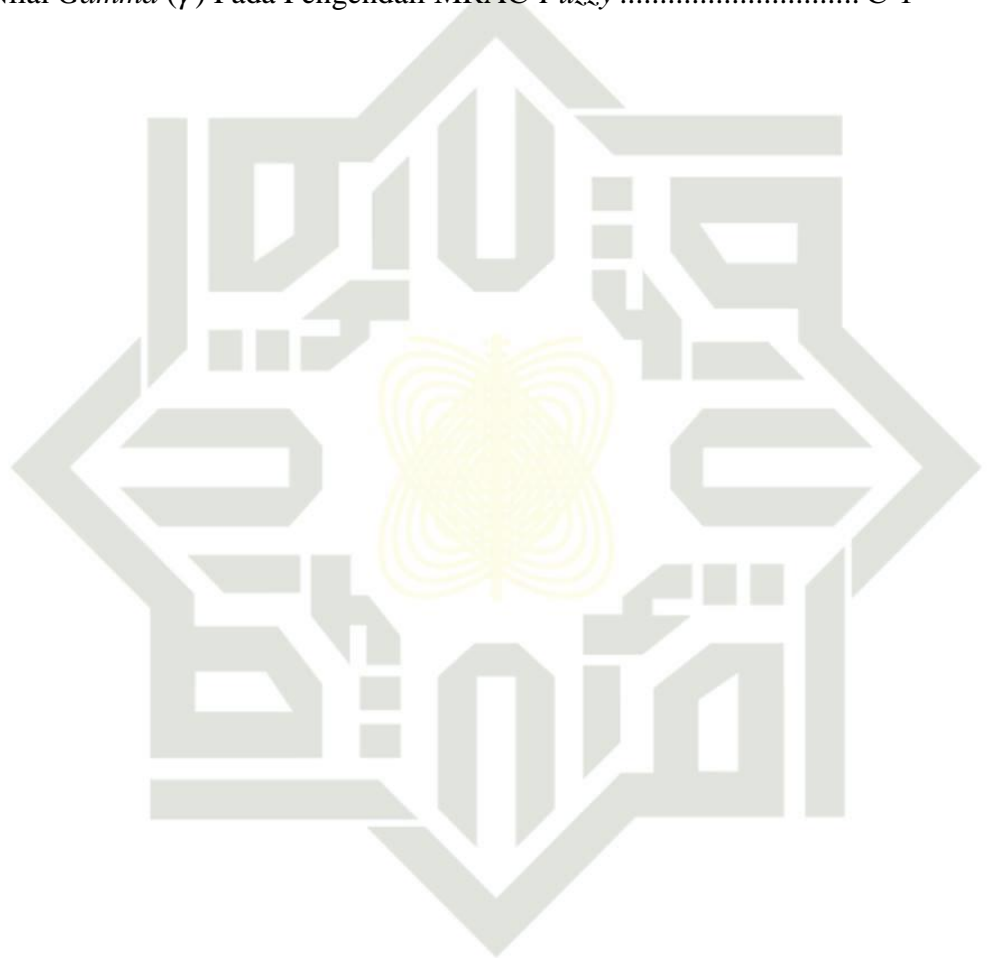
Lampiran

Halaman

A. Blok Diagram <i>Simulink Open Loop</i> , MRAC, MRAC- <i>Fuzzy</i>	A-1
B. Proses <i>Tuning</i> Nilai <i>Gamma</i> (γ) pada pengendali MRAC	B-1
C. Proses <i>Tuning</i> Nilai <i>Gamma</i> (γ) Pada Pengendali MRAC- <i>Fuzzy</i>	C-1

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.





BAB I PENDAHULUAN

Latar Belakang

Perkembangan dan kemajuan teknologi hingga saat ini memungkinkan terjadinya otomatisasi hampir di semua bidang terutama bidang industri. Manusia dituntut dalam menerapkan teknologi inovasi terbaru yang lebih efektif dan efisien untuk memudahkan pekerjaannya. Perkembangan teknologi di bidang industri seperti motor listrik banyak digunakan karena memiliki efisiensi, torsi, kecepatan tinggi dan mudah dikontrol kecepatannya. Peralatan yang banyak digunakan dalam dunia industri adalah motor DC, namun terdapat banyak kekurangan seperti selalu menimbulkan *snoring/ electrical noise* karena sikat memutus dan menghubungkan antara sistem dengan motor serta biaya perawatan yang cukup tinggi. Oleh karena itu, peran penggunaan motor DC di bidang industri mulai perlahan digantikan oleh motor *Brushless DC*.

Motor *Brushless DC* merupakan pengembangan dari motor arus searah tanpa sikat, motor ini mulai pembaharuan dan banyak digunakan dalam dunia bidang industri. Motor tersebut memiliki efisiensi tinggi, kecepatan yang tinggi dan dapat di variasikan dengan biaya perawatan yang rendah[1]. Motor ini juga memiliki parameter yang dapat dikendalikan diantaranya yaitu kecepatan dan posisi, dengan rentang kecepatan yang lebar maka diperlukan pengaturan kecepatan pada motor *Brushless DC* [2]. Motor *brushless DC* telah diaplikasikan diberbagai aplikasi antara lain mobil listrik, *lift*, otomotif, *Heating Ventilating and Air Conditioning* (HVAC), mesin CNC, Robot Industri, *Quadcopter* dan lain lain

Motor *brushless DC* ini juga bersifat komutasi elektrik sehingga yang memindahkan arus yaitu mikrokontroler. Pada mikrokontroler juga dapat mengatur kecepatan motor yang lebih efisien yang lebih akurat (presisi). Penulis telah melakukan pengujian pra-simulasi sistem kecepatan motor *brushless DC* secara *open-loop* membuaikan hasil respons sistem yang stabil akan tetapi sistem melewati nilai *set point* yang diberikan sehingga adanya *error steady state* yang cukup besar yaitu 13.48 V dengan *set point* 1 V. Maka dari itu diperlukan pengendalian pada kecepatan putaran dari motor *brushless DC* agar respons sistem mencapai *set point* dan tahan terhadap gangguan.



Kecepatan dan posisi bisa terganggu dari faktor luar atau lingkungan[3], sehingga penggunaan sistem kontrol adaptif mampu mengendalikan kecepatan dan posisi pada motor *brushless* DC. Sistem kontrol adaptif adalah sistem kontrol dimana parameternya dapat diatur dan juga memiliki mekanisme untuk mengatur parameter tersebut, sehingga pemasalahannya adalah bagaimana mendapatkan metode pengaturan kontroler ketika karakteristik proses dan lingkungan tidak diketahui atau berubah [4]. Sistem kendali adaptif merupakan pengontrol yang dapat memodifikasi perilakunya sebagai respon terhadap perubahan dinamika proses dan gangguan. Ada beberapa alasan mengapa harus memilih kontrol adaptif antara lain ialah parameter dapat bervariasi dikarenakan sistem *non-linear*, lalu dapat menyesuaikan apabila ada perubahan kondisi atau gangguan dalam proses pengontrolan serta efisiensi yang sangat baik [5]. Maka dengan ini penulis memilih kendali adaptif karena sistem pengontrolannya sangat mudah yang dapat menyesuaikan parameter dengan mekanisme sistem.

Beberapa peneliti telah merancang sebuah kendali pada model matematis motor *Brushless* DC yang dikembangkan dari model sederhana motor DC seperti kendali logika Fuzzy, *Sliding Mode Control* (SMC), *Propositional Integral Derivative* (PID) dan *Model Reference Adaptive Control* (MRAC). Pada penelitian pengendali kecepatan pada motor *Brushless* DC dengan gabungan Fuzzy-PID dapat dihasilkan kendali fuzzy memiliki kelemahan dalam mengendalikan sistem terdapat *overshoot* sebesar 2,7778% pada waktu penetapan (*settling time*) sebesar 0,0012 detik, pengendali PID menunjukkan respons yang baik dengan tercapainya *set point* dan *error steady state* yang minimum. Namun, pada pencapaian *set point* terjadinya perubahan *settling time* sebesar 0,0048 detik. Penambahan PID terhadap Fuzzy menghasilkan respons waktu yang sangat baik, gangguan yang diberikan juga berhasil diatasi serta mampu menurunkan *overshoot* maksimum yang terjadi pada pengendalian kecepatan motor *brushless* DC dari 2,7778% menjadi 0,12908% [6].

Selanjutnya perancangan pengendali *hybrid* SMC-PID dalam mengatur kecepatan motor *brushless* DC sudah dilakukan, dapat di analisa bahwa pengendali SMC dapat mendekati *set point* sebesar 1 volt pada *settling time* 0,0045 detik dan mengalami *error steady state* sebesar 0,0007 Volt. Penambahan PID pada pengendali SMC dapat mempercepat respons waktu yaitu sebesar 0.0023 detik dan *error steady state* 0 volt [7]. Namun pada pengendali SMC masih terdapat kekurangan yaitu pada *chattering* yang tidak bisa dihilangkan [8].



Dalam pengaturan kecepatan motor *brushless* DC agar performansi lebih baik maka diperlukan sebuah pengendali yang mampu mengatasi masalah dari motor tersebut. Ada banyak modifikasi dan rancangan sistem pengendali yang sekarang ini mulai digunakan dalam mengatasi gangguan seperti kendali MRAC. Pada perancangan pengendali MRAC kombinasi PID dalam mengatur kecepatan motor *brushless* DC penelitian ini menggunakan metode MIT-rule karena penggunaannya yang mudah dan tidak terlalu rumit. Hasil simulasi yang telah dilakukan respons waktu pada motor sangatlah cepat yaitu *settling time* sebesar 0,02837 detik mampu mengikuti model referensi, namun *overshoot* yang cukup besar yaitu 18,2 % yang mengakibatkan terjadinya osilasi pada sistem. Penambahan kendali PID pada MRAC dapat mengatasi *overshoot* yang terjadi dari 18,2% menjadi 0,04 %. Namun terjadinya perubahan respons waktu *settling time* menjadi 0.0476 detik dan ketika diberikan gangguan 10% dari *set point* pada detik 0,2 dan 0,3 terjadinya titik puncak gangguan pada detik 0,2072 dengan tegangan sebesar 1,3099 volt dan waktu untuk kembali stabil respons waktu masih lambat dengan mencapai *setpoint* pada waktu 0,4216 detik dan *error steady state* sebesar 0,0001 [3].

Selanjutnya penelitian terkait perancangan *fuzzy modified model reference adaptive control* untuk pengaturan kecepatan motor arus searah tanpa sikat, menunjukkan indeks performansi masing-masing sistem MRAC dan FMRAC pada kondisi beban minimal, nominal, dan maksimal. terlihat bahwa selisih rise time antara model referensi dan FMRAC selalu lebih kecil yaitu 0,464 detik untuk beban minimal, 0,005 detik untuk beban nominal dan 0,259 detik untuk beban maksimal. Sedangkan selisih rise time model referensi dengan MRAC yaitu 1,507 detik untuk beban minimal, 0,387 detik untuk beban nominal dan 0,772 detik untuk beban maksimal. Dari hasil simulasi dan implementasi, dapat disimpulkan bahwa *Fuzzy-MRAC* dapat memperbaiki waktu konvergensi antara plant dengan model dibuktikan dengan selisih *rise-time* dan *settling-time* FMRAC dengan model referensi yang selalu bernilai lebih kecil dibandingkan dengan MRAC biasa.

Berdasarkan studi literatur pada penelitian ini simulasi secara *open loop*, motor *brushless* DC belum mencapai performansi yang baik sesuai dengan harapan. Beberapa studi pustaka dalam mengendalikan kecepatan motor Brushless DC belum menunjukkan performansi yang baik, karena masih terdapat osilasi, *error steady state* dan respons waktu yang lambat pada sistem. Oleh sebab itu, dipilih pengendali *Model Reference Adaptive Control* (MRAC), dimana pengendali ini memiliki kelebihan mampu beradaptasi dengan



perubahan lingkungan sehingga *overshoot* dapat dikurangi dan performa keluaran sistem dapat mengikuti performa keluaran model referensi yang sudah ditentukan [4]. Namun, berdasarkan hasil uji simulasi pra penelitian yang dilakukan pada pengendali MRAC untuk pengendalian motor *brushless* DC belum didapatkan hasil yang maksimal. Karena sistem mampu mengikuti model referensi yang sudah ditentukan namun masih terdapat osilasi yang mengakibatkan *overshoot* pada sistem ketika mencapai *set point*. Oleh karena itu, pada penelitian ini pengendali *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) akan dikombinasikan dengan pengendali *fuzzy*.

Kendali *fuzzy* menyediakan metode sederhana untuk mendesain sistem *non linear* pengontrol berdasarkan pendekatan heuristik. Beberapa peneliti terdahulu telah melakukan penelitian terkait aksi gabungan dari pengendali *fuzzy* dan PID. Di antaranya adalah sistem kendali PID-Fuzzy pada pengatur kecepatan motor 3 fasa. Penelitian tersebut dijelaskan bahwa pengendali PID - Fuzzy dapat memperoleh respons dan *recovery time* yang lebih baik dan tahan terhadap *disturbance*/gangguan, hal ini dapat dilihat dari hasil pengujian sistem dengan pemberian *disturbance*, *undershoot* dan *overshoot* yang terjadi dari pemberian beban dan pelepasan beban dapat diredam[9].

Selanjutnya pada penelitian yang berjudul *Automated Calibration of a fuzzy Logic Controller* kendali *fuzzy* yang melakukan simulasi perbandingan kendali Fuzzy dan kendali PD pada motor DC dengan menghasilkan kendali *fuzzy* lebih baik daripada kendali PD dalam mengatasi *overshoot* dengan perbandingan 3.3 % dan 5 %[10]. Selain itu pada perancangan kombinasi pengendali MRAC-Fuzzy dalam kontrol posisi motor aktuator linier DC pada pengemudi kendaraan robot sangat baik dengan memberikan posisi yang tepat dan akurat dengan *overshoot* sebesar 0,1619 %[11]. Dengan penambahan kendali *fuzzy* pada MRAC dapat menekan *overshoot* dan kekokohan MRAC-Fuzzy untuk mengontrol aktuator linier yang dirancang menunjukkan kesesuaian dan akurasi yang baik untuk mengikuti berbagai input ke sistem.

Pengendali *fuzzy* berfungsi untuk mengatasi kekurangan dari pengendali MRAC yang terdapat *overshoot* pada sistem, seperti yang sudah dilakukan penelitian sebelumnya. Pengendali logika *fuzzy* memiliki beberapa metode yang sering digunakan yaitu metode sugeno dan mamdani. Metode mamdani digunakan untuk kondisi yang terdapat pakar yang mempengaruhi sistem sedangkan metode sugeno digunakan untuk kondisi yang tidak terdapat pakar, namun nilai matematis *plant* yang dirancang telah ketahu[12]. Pada

penelitian ini akan menggunakan kendali *fuzzy* mamdani karena *fuzzy* mamdani sangat baik digunakan untuk tempat yang sering berubah ubah, karena seorang perancang sistem kendali *fuzzy* perlu menyesuaikan parameter dan *rules* untuk mendapatkan hasil yang akurat dan mempunyai kestabilan[6].

Maka, berdasarkan latar belakang di atas maka dapat dilakukan penelitian tugas akhir dengan judul “Perancangan pengendali MRAC kombinasi kendali *fuzzy* mamdani Pada Kecepatan Motor *Brushless* DC”

1.1. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana performansi kendali *hybrid* MRAC-Fuzzy pada kecepatan motor *Brushless* DC untuk menghilangkan *Error Steady State*, menghilangkan *overshoot*, respons waktu yang cepat dan kekokohan sistem terhadap sinyal gangguan.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah mendesain pengendali *hybrid* MRAC-Fuzzy untuk mendapatkan performansi yang lebih baik yaitu *Error Steady State* minimum yang mendekati nol, menghilangkan *overshoot*, respons waktu yang cepat dan kekokohan sistem terhadap sinyal gangguan pada pengendali kecepatan motor *Brushless* DC.

1.3. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah sebagai berikut:

1. Pemodelan sistem motor *Brushless* DC yang digunakan adalah *type* Maxon EC flat 45 mm.
2. Variabel yang dikendalikan pada penelitian ini adalah kecepatan motor *Brushless* DC.
3. Metode yang digunakan pada kendali MRAC adalah MIT *Rule* dan pada kendali *Fuzzy* adalah metode Mamdani
4. Tugas akhir ini berupa simulasi menggunakan *software* Matlab.
5. Penurunan model matematis sistem dirujuk dari penelitian Vinod KR Singh Patel dan A.K.Pandey[13].
6. Tidak membahas perangkat keras motor *Brushless* DC.

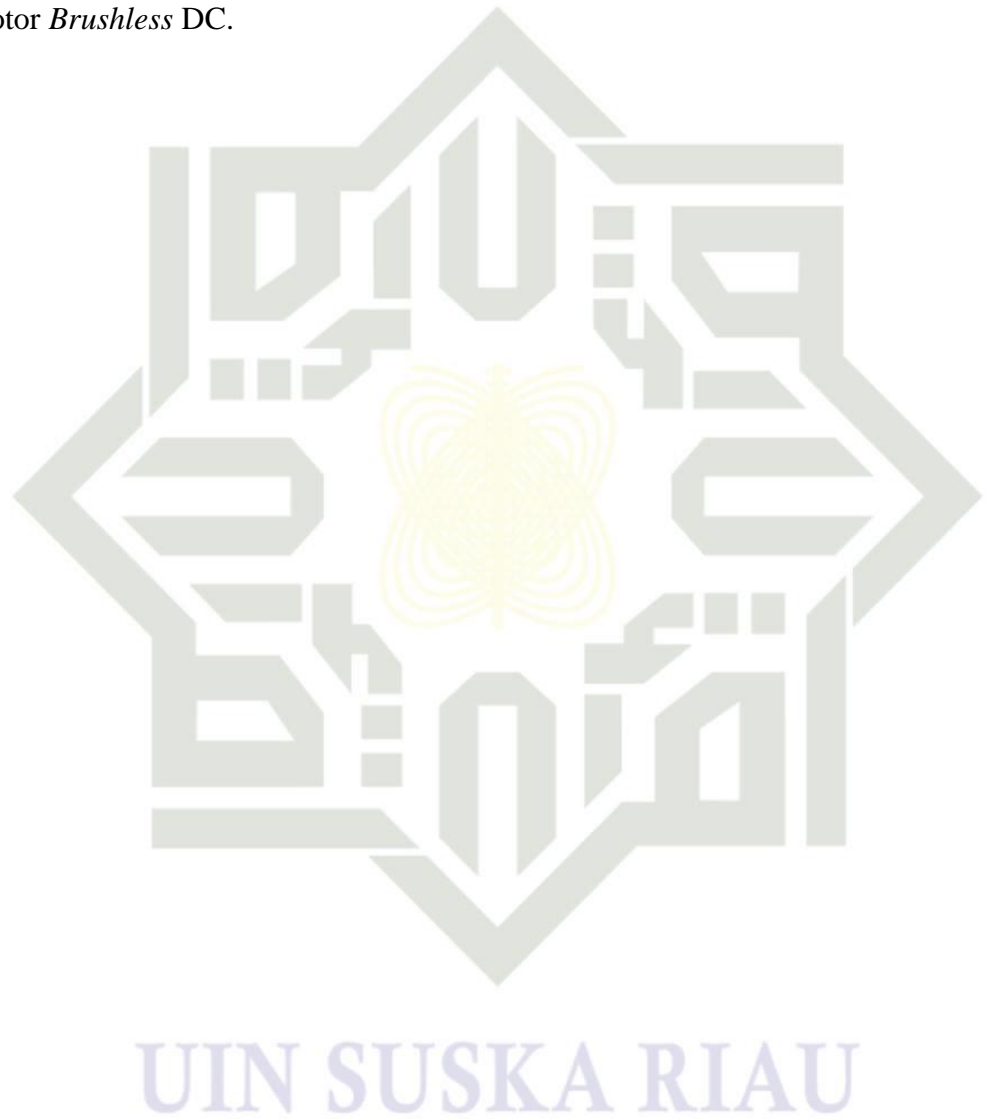


Manfaat Penelitian

1. Dapat mengatasi kelemahan motor *Brushless* DC dalam mengatur kecepatan saat ada gangguan.
2. Meningkatkan performansi pengendali pada kecepatan motor *Brushless* DC yang kemudian bisa diterapkan pada sistem yang sebenarnya.
3. Dapat memberi pengetahuan dan keilmuan tambahan di bidang pengaturan kecepatan motor *Brushless* DC.

Daftar Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Diararang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diararang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian Terkait

Pada penelitian Tugas Akhir ini penulis telah melakukan tinjauan pustaka pada jurnal, buku dan paper yang mendukung penelitian ini. Berdasarkan tinjauan pustaka telah banyak yang membahas sistem kendali pada motor *Brushless* DC menggunakan pengendali yaitu *Jaringan Syaraf Tiruan* (JST), *Sliding Mode Control* (SMC), *Logika Fuzzy*, *Fuzzy Inference System* (FIS), *Proposional Integral Derivative* (PID) dan beberapa kendali lainnya.

Dalam penelitian “Perancangan Pengendali kecepatan motor DC menggunakan kendali MRAC kombinasi PID”, kendali utamanya ialah MRAC dengan respon waktunya *rise time* masih lambat yaitu sebesar 1,7934 detik dengan waktu simulasi 10 detik, namun saat di kombinasikan dengan pengendali MRAC dengan pengendali PID didapatkan respons yang cukup baik, dengan hasilnya motor DC menunjukkan perfomansi yang baik kembali ke *set point* pada detik 0,0989 yang memiliki *Ess* sebesar 0,1312 rad/s[14].

Selanjutnya penelitian yang judul “Desain Sistem Pengendali Kecepatan Motor *Brushless* DC Menggunakan Pengendali *Hybrid* Logika *Fuzzy* – PID”, Perancangan pengendali utama yaitu mendesain kendali *fuzzy*, lalu merancang kendali PID, setelah itu penggabungan pengendali *fuzzy* dan PID. Sistem ditambahkan dan dilakukan pengujian. Berdasarkan pengujian terlihat bahwa terdapat gangguan yang diberikan pada detik ke 0.2 sampai detik ke 0.3. Setelah diberikan gangguan sebesar 15% nilai *se tpoint* hasilnya kecepatan motor *Brushless* DC berubah naik dari nilai *set point* 500 Rpm menjadi 500.6454 Rpm dengan maksimum *overshoot* 0,12908% sampai detik ke 0.3. Dan kembali stabil ke 500 Rpm pada detik ke 0.3001 [6].

Penelitian selanjutnya “Perancangan Kontroler *Fuzzy Model Reference Learning Control* (FMRLC) Berbasis Mikrokontroler ATMEGA16 sebagai Kendali Motor *Brushless* DC”. FMRLC merupakan modifikasi *metode fuzzy logic control* (FLC) dan *metode model reference adaptive control* (MRAC) Berdasarkan seluruh uji coba yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa respons transien pengontrolan bergantung pada pemilihan konstanta waktu model, semakin besar konstanta yang dipilih maka semakin lama respons

transien dalam mencapai steady state. Nilai *steady state* respons sistem pada referensi 2500 rpm yang didapat ketika model referensi menggunakan konstanta waktu 5 detik sebesar 0,2 detik, konstanta waktu 6 detik sebesar 8,13 detik, konstanta waktu 7 detik sebesar 9,11 detik, konstanta waktu 8 detik sebesar 10,75 detik, dan konstanta waktu 9 detik sebesar 12,68 detik.[15]

Penelitian selanjutnya “Perancangan pengendali *Model Reference Adaptive Control* MRAC kombinasi PID untuk mengendalikan kecepatan motor BLDC”. berdasarkan hasil simulasi dan analisa dapat disimpulkan bahwa kendali MRAC dapat mencapai *set point* dengan respons waktu 0.02837 detik dalam 0.5 detik total waktu simulasi saat mengimplementasikan hanya menggunakan MRAC saja namun masih memiliki *overshoot* sebesar 18,2 %. Dengan penambahan kendali PID pada MRAC terjadinya lambat respons waktu sebesar 0.0476 detik namun pada waktu *delay* lebih cepat yaitu 0.0153 detik dan *overshoot* yang mengecil menjadi 0.04%. lalu saat diberikan gangguan pada pengendali MRAC dan PID mampu stabil menuju *set point* lebih cepat dibandingkan pengendali MRAC[3].

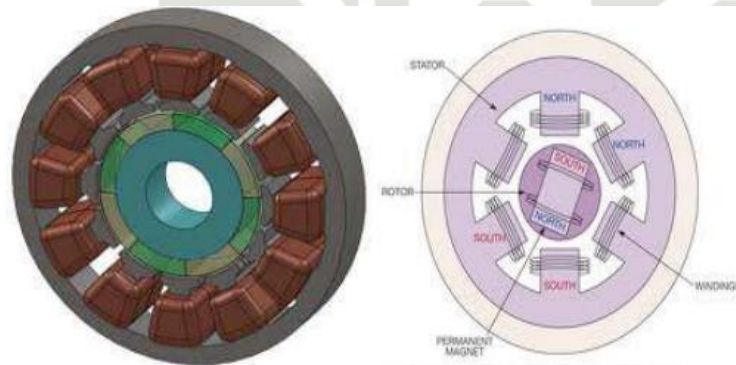
Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, didapatkan beberapa pengendali yang telah digunakan pada pengendalian kecepatan motor *brushless* DC ini. Hasil keluaran yang diperoleh dari beberapa pengendali sudah baik walaupun masih ada yang belum berhasil mencapai *set point* dan masih terjadi osilasi ketika diberi gangguan, maka penulis ingin merancang sebuah pengendali yang dimana mampu mencapai *set point*, juga bisa menjaga performa sistem agar tahan terhadap gangguan. Oleh karena itu penulis mengusulkan melakukan penelitian tentang analisis identifikasi sistem pada motor *brushless* DC dengan menggunakan pengendali MRAC-Fuzzy untuk mengendalikan kecepatan.

2.2 Motor Brushless DC

Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) sudah banyak digunakan dalam perkembangan industri sebagai penggerak putaran mulai dari otomotif, peralatan otomasi industri, instrumentasi dan lainnya. Motor *brushless* DC selain memiliki kecepatan yang lebih tinggi juga memiliki biaya perawatan yang relatif rendah karena tanpa memiliki sikat atau *brush*. Motor ini memiliki efisiensi yang lebih tinggi dari pada motor induksi karena rotor terbuat dari magnet permanen dan mampu berputar dengan tetap pada sumbu

motor. Namun dibalik kelebihan terdapat kelemahan dari motor *brushless* DC seperti halnya pada proses komutasi. Untuk mengatasi kekurangan tersebut maka proses *switching* mekanik digantikan oleh komutasi elektronik. Dengan demikian fungsi *switch* mekanik diperbarui menjadi fungsi *switch* elektronik (*Electronically Commutated*) karena *Electronically Commutated Motor* beroperasi tanpa *brush* maka motor jenis ini disebut motor *Brushless* DC. Komutator elektronik terdiri dari *transistor* atau *thyristor* dengan memerlukan pulsa atau sinyal, yang bergantung pada posisi rotor dan aktif pada waktu yang tepat. yang memerlukan sinyal atau pulsa penyalaan, yang bergantung pada posisi rotor, dan memungkinkan mereka aktif pada waktu yang tepat [6].

Motor DC adalah salah satu dari kelas motor listrik putar yang mengubah energi listrik arus searah menjadi energi mekanik jenis yang paling umum bergantung pada gaya yang dihasilkan oleh medan magnet. Motor *Brushless* DC adalah pengembangan dari motor DC yang menggunakan sikat dan mereka memiliki kurva karakteristik torsi dan kecepatan yang sama. Masalah besar yang sering terjadi pada motor DC salah satunya adalah proses komutasi. Komutasi mekanik menyebabkan keterbatasan kinerja motor. Ada jenis pembeda motor *Brushless* DC yaitu Pada jenis *inner* rotor posisi *rotor* berada didalam yang dikelilingi oleh stator sedangkan pada jenis *outer* rotor posisi *rotor* berada diluar.



Gambar 2. 1 Penampang Motor *Brushless* DC[16]

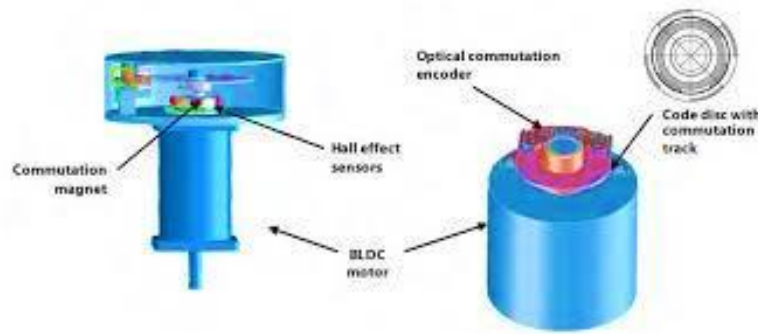
Seperti kita lihat pada gambar 2.1 perlu pemahaman tentang prinsip kerja, secara pemahaman kinerjanya sama antara *inner* rotor dan *outer rotor*, hanya saja kecepatan dan torsi yang dihasilkan akan berbeda. *Inner* rotor menghasilkan torsi yang lebih kecil dan kecepatan yang lebih cepat dibandingkan *Outer rotor*. Hal tersebut disebabkan oleh penggunaan jumlah magnet pada *rotor*-nya. Semakin banyak magnet pada *rotor*, maka

2. Dianggap mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

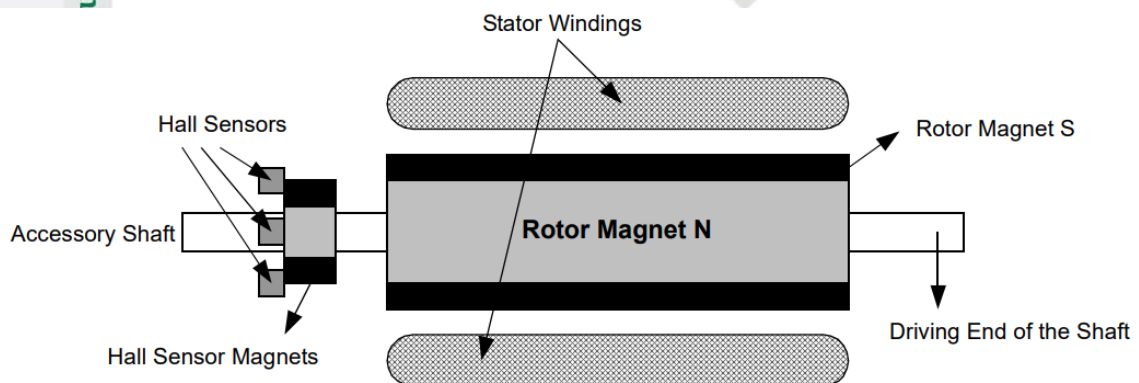
2.2.1 Kontruksi Motor Brushless DC

Secara kontruksi motor *Brushless* DC ini sangat mirip dengan motor AC dikarenakan strukturnya hamper sama dari motor 3 fasa *Brushless* DC, motor *polyphase* AC juga mempunyai gulungan yang sama, dan *rotor*-nya terdiri dari satu atau lebih magnet secara permanen[16]



Gambar 2. 2 Sensor hall dan Enconder pada motor *Brushless* DC[17]

Dapat disimpulkan bahwa motor *Brushless* DC memiliki motor performa tinggi yang mampu menghasilkan torsi yang besar pada rentang kecepatan yang besar. Dengan tidak adanya *brush* pada motor *brushless* DC, maka dalam menentukan *timing* komutasi diperlukan 3 buah sensor *hall* untuk mendapatkan 6 kombinasi *timing* yang berbeda. Untuk menentukan *timing* komutasi yang terdapat pada motor ini sehingga didapatkan torsi dan kecepatan yang konstan, diperlukan 3 buah sensor *Hall* dan atau *encoder*. sedangkan pada *encoder*, *timing* komutasi ditentukan dengan cara menghitung jumlah pola yang ada pada *encoder*.



Gambar 2. 3 Bentuk melintang Motor *Brushless* DC [16]



2.1.2 Prinsip Kerja Motor *Brushless* DC

Secara kinerja motor *brushless* DC ialah sebuah motor dengan permanen magnet menggunakan rangkaian elektronik untuk pengontrol dan sensor posisi dengan karakteristik yang hampir sama dengan motor DC konvensional namun tidak memiliki komutator atau sikat. Motor bekerja ketika stator yang terbuat dari kumparan diberikan arus 3 fasa. Akibat arus yang melewati kumparan pada stator timbul medan magnet

$$B = \frac{\mu Ni}{2l} \quad (2.1)$$

Dimana:

N = Jumlah lilitan

I = Arus

l = Panjang lilitan dan

μ = Permeabilitas

Karena arus yang diberikan berupa arus AC 3 fasa *sinusoidal* maka nilai medan magnet dan polaritas setiap kumparan akan berubah-ubah setiap saat. Akibat yang ditimbulkan dari adanya perubahan polaritas dan besar medan magnet tiap kumparan adalah terciptanya medan putar magnet dengan kecepatan.

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (2.2)$$

Dimana:

f = Frekuensi arus input

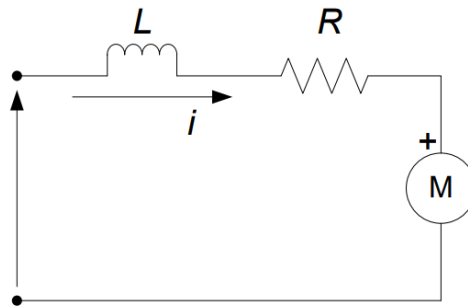
p = Jumlah pole roto

2.2.3 Model Matematika Motor *Brushless* DC

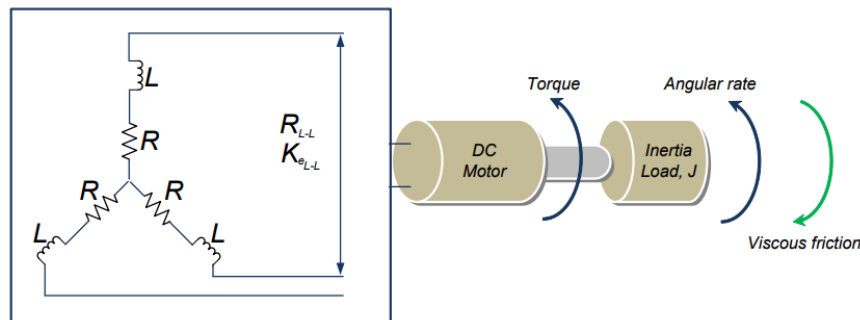
Motor *Brushless* DC secara umum tidak berbeda dengan motor *brushless* DC konvensional. Untuk pemodelan motor *brushless* DC dapat dilihat pada gambar 2.4.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2. 4 Rangkaian motor listrik sederhana [18]



Gambar 2. 5 Diagram Simetris *Brushless* DC [18]

Menggerakkan hokum tegangan *kirchoff* :

$$V_s = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (2.3)$$

Pada kedudukan tetap (kedudukan DC pada frekuensi 0) $V_s = Ri + e$

Selain itu untuk kedudukan tidak stabil, persamaan 2.3 diatur ulang untuk menyajikan *back* EMF, seperti yang ditunjukkan dalam persamaan 2.4 di bawah ini:

$$e = -Ri - L \frac{di}{dt} + V_s \quad (2.4)$$

Dimana

V_s = Sumber tegangan DC

i = Arus dinamo

Sama halnya dengan mempertimbangkan sifat matematis dari motor DC, berdasarkan hukum gerak newton kedua, sifat matematis tergantung pada putaran dari sistem pengatur pada gambar 2.3 dan 2.4 kan menjadi hasil beban inersia, J adalah rotor inersia dan ω_m adalah kecepatan sudut, berikut ini adalah persamaan 2.5 dan 2.6



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = \sum T_i \quad (2.5)$$

$$T_e = k_f \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} T_L \quad (2.6)$$

Dimana

T_e = Putaran elektrik

k_f = Gesekan konstan

J = Rotor inersia

ω_m = Kecepatan sudut

T_L = Beban mekanik

Putaran elektrik dan *back* EMF dirumuskan menjadi:

$$e = k_e \omega_m \text{ dan } T_e = k_t \omega_m \quad (2.7)$$

Dimana :

k_e = *Back* EMF konstan

k_t = Putaran konstan

Kemudian tulis kembali 2.4 dan 2.5, persamaan 2.8 dan 2.9 maka diperoleh:

$$\frac{di}{dt} = -i \frac{R}{L} - \frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} V_s \quad (2.8)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = i \frac{k_t}{J} - \frac{k_f}{J} \omega_m + \frac{1}{J} T_L \quad (2.9)$$

Menggunakan *transformasi laplace* untuk mengevaluasi dua persamaan 2.8 dan 2.9, berikut ini diperoleh dengan cepat (semua kondisi awal diasumsikan 0):

Untuk persamaan 2.8

$$\left\{ \frac{di}{dt} = -i \frac{R}{L} - \frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} V_s \right\} \quad (2.10)$$

Berarti,

$$sI = -i \frac{R}{L} - \frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} V_s \quad (2.11)$$

Untuk persamaan 2.9



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$\left\{ \frac{d\omega_m}{dt} = -i \frac{k_t}{L} - \frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} T_L \right\} \quad (2.12)$$

$$s\omega_m = -i \frac{k_t}{J} - \frac{k_f}{J} \omega_m + \frac{1}{J} T_L \quad (2.13)$$

Tanpa beban untuk $T_L = 0$ persamaan dari 2.13 menjadi

$$s\omega_m = -i \frac{k_t}{J} - \frac{k_f}{J} \omega_m \quad (2.14)$$

Untuk persamaan 2.14, I pada persamaan 2.11 diganti dengan menggunakan persamaan berikut:

$$= \frac{s\omega_m + \frac{k_f}{J} \omega_m}{\frac{k_t}{J}} \quad (2.15)$$

$$\left(\frac{s\omega_m + \frac{k_f}{J} \omega_m}{\frac{k_t}{J}} \right) \left(s + \frac{R}{L} \right) = -\frac{K_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} V_s \quad (2.16)$$

Persamaan 2.16 menjadi

$$\left\{ \left(\frac{S^2 J}{k_t} + \frac{sk_f}{k_t} + \frac{sRJ}{k_t L} + \frac{k_f R}{k_t L} \right) + \frac{K_e}{L} \right\} \omega_m = \frac{1}{L} V_s \quad (2.17)$$

Kemudian persamaan 2.17 berubah jadi 2.18

$$= \left\{ \frac{S^2 J + sk_f + sRJ + k_f R + k_e k_t}{k_t} \right\} \omega_m \quad (2.18)$$

Maka, *transfer function* dapat di cari dengan mnegggunakan rasio dan kecepatan sudut, ω_m untuk sumber tegangan V_s adalah:

$$(s) = \frac{\omega_m}{V_s} = \frac{k_t}{S^2 J + sk_f + sRJ + k_f R + k_e k_t} \quad (2.19)$$

Fungsi di tersebut disederhanakan menjadi:

$$(s) = \frac{\omega_m}{V_s} = \frac{k_t}{S^2 J + (RJ + k_f L) + k_f R + k_e k_t} \quad (2.20)$$

Dengan mempertimbangkan asumsi berikut:

Gesekan konstan kecil, yaitu k_f mendekati 0, ini berarti:

$$RJ \gg k_f L \text{ dan}$$

$$k_e k_t \gg R k_f$$



Dengan itu diabaikan, penyederhanaan fungsi alih berubah menjadi:

$$G(s) = \frac{\omega_m}{V_s} = \frac{k_t}{s^2 J L + R J s + k_e k_t} \quad (2.21)$$

$$G(s) = \frac{\frac{k_t R}{k_e k_t R}}{\frac{s^2 J L R}{k_e k_t R} + \frac{R J S R}{k_e k_t R} + \frac{k_e k_t R}{k_e k_t R}} \quad (2.22)$$

$$G(s) = \frac{\frac{R}{k_e k_t} \times \frac{1}{R}}{\frac{R}{k_e k_t} \times \frac{1}{R}} \quad (2.23)$$

Jadi dengan disusun ulang dan manipulasi matematis pada JL se, dengan mengalikan atas dan bawah dari persamaan 2.23, yaitu:

$$\frac{R}{k_e k_t} \times \frac{1}{R}$$

Maka diperoleh persamaan setelah manipulasi sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{\frac{1}{k_e}}{\frac{R J}{k_e k_t} \frac{L}{R} s^2 + \frac{R J}{k_e k_t} s + 1} \quad (2.24)$$

Berdasarkan persamaan 2.2 maka diperoleh rumus

untuk *mechanical (time constant)* :

$$\tau_m = \frac{R J}{k_e k_t} \quad (2.25)$$

untuk *Electrical (time constant)* :

$$\tau_e = \frac{L}{R} \quad (2.26)$$

Menggabungkan persamaan 2.25 dan 2.26 ke dalam persamaan 2.24;

$$G(s) = \frac{\frac{1}{k_e}}{\tau_m \tau_e s^2 + \tau_m s + 1} \quad (2.27)$$

Pada permodelan motor *brushless* DC tidak jauh berbeda dengan motor DC, hal yang membedakan permodelannya terletak pada *fase* yang mempengaruhi hasil keseluruhan model *brushless* DC. Fase khusus yang mempengaruhi resitif dan induktif dari susunan *brushless* DC. Misalnya pengaturan sederhana dengan simetris 3-*fase* dan koneksi internal yang bisa memberikan gambaran singkat tentang keseluruhan konsep yang ada.

Pada persamaan 2.24 – 2.26, kita dapat melihat perbedaan pada motor DC dan motor *brushless* DC. Perbedaan ini mempengaruhi mekanis awal dan elektrik konstan dikarenakan mereka merupakan bagian yang sangat penting dalam model parameter.

Untuk ketetapan *mechanical time constant* dengan pengaturan sistematis, persamaan 2.25 menjadi:

$$\tau_m = \sum \frac{RJ}{k_e k_t} = \frac{J \sum R}{k_e k_t} \quad (2.28)$$

Electrical time constant,

$$\tau_m = \sum \frac{L}{R} = \frac{L}{\sum R} \quad (2.29)$$

Oleh karena itu dengan adanya susunan sistematis dan fase ke-3, *mechanical* dan *electrical constant* diketahui menjadi:

Mechanical constant,

$$\tau_m = \frac{J.3R}{k_e k_t} \quad (2.30)$$

Electrical constant,

$$\tau_m = \frac{L}{3.R} \quad (2.31)$$

Efek fase,

$$\tau_m = \frac{3.R_0 J}{\left(\frac{k_e(L-L)}{\sqrt{3}} \right).k_t} \quad (2.32)$$

Sehingga persamaan 2.32 berubah menjadi:

$$\tau_m = \frac{3.R_0 J}{k_e.k_t} \quad (2.33)$$

Dimana k_e merupakan nilai dari *fase* EMF tegangan konstan:

$$k_e = \frac{k_e(L-L)}{\sqrt{3}} \quad (2.34)$$

Lalu terdapat hubungan antara k_e dan k_t yaitu menggunakan tenaga elektrik (sisi kiri) dan (sisi kanan) maka:

$$3 \times E \times I = \frac{2\pi}{60} \times N \times T$$



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$F = \frac{T}{l} \times \frac{2\pi \times 1}{60 \times \sqrt{3}}$$

$$k_e = k_t \times \frac{2\pi \times 1}{60 \times \sqrt{3}}$$

$$k_e = k_t \times 0.0605 \quad (2.35)$$

Dimana

F = Percepatan (v/s)

ω = Kecepatan putar motor (R)

T = Medan Magnet (Nm)

l = Arus Listrik (A)

$$T_e = \left[\frac{V-secs}{rad} \right] : \text{Torsi elektrik} \quad (2.36)$$

$$k_e = \left[\frac{N-M}{A} \right] : \text{Torsi konstan} \quad (2.37)$$

Kemudian adapun persamaan untuk motor *Brushless* DC dapat diperoleh dari persamaan 2.25 berikut dengan menghitung efek konstan dan *fase*, maka:

$$G(s) = \frac{\frac{1}{k_e}}{\tau_m \cdot \tau_e \cdot s^2 + \tau_m \cdot s + 1} \quad (2.38)$$

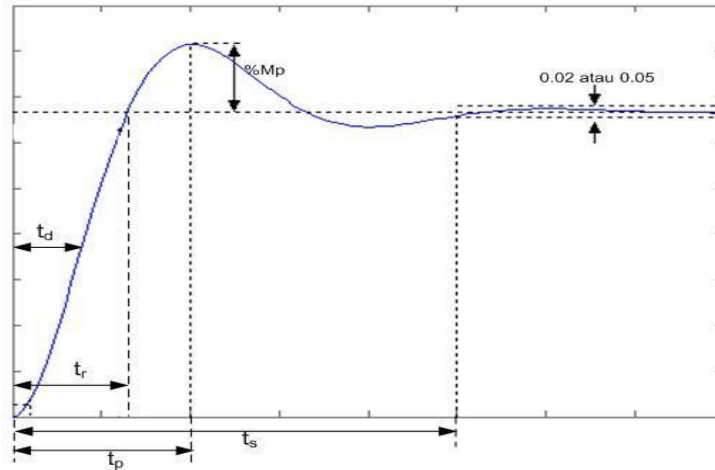
2.3 Identifikasi Sistem

Identifikasi sistem yang muncul pada *respons* transien sistem dalam kondisi *loop*

tertutup

2.3.1 Respons Transient Sistem Orde Dua [19]

Pengamatan dalam respons orde dua dapat dilihat secara grafis pada *step*, respons sistem *open loop* pada sinyal uji yang diberikan kita dapat mengetahui karakteristik sistem tersebut. Terlihat pada gambar 2.6 merupakan sistem orde dua.



Gambar 2. 6 Respons Sistem Orde Dua [19]

Adapun tanggapan *transient* dalam respons waktu ialah:

1. Waktu tunda / *delay time*, (t_d) :

Waktu yang dibutuhkan dalam tanggapan untuk mencapai setengah dari nilai keluaran pertama kalinya.

2. Waktu naik / *rise time* (t_r) :

Waktu yang dibutuhkan untuk naik dari 10% – 90%, 5% – 95%, atau 0% – 100% dari nilai akhir dari tanggapan. Untuk kasus *underdamped*, biasanya digunakan kriteria 0% – 100%. Untuk kasus *overdamped*, biasanya digunakan kriteria 10% – 90%.

3. Waktu puncak / *peak time* (t_p) :

Waktu yang dibutuhkan tanggapan untuk mencapai nilai puncak dari *overshoot* pertama kali.

4. *Overshoot* maksimal (M_p)

Nilai puncak maksimum dari tanggapan diukur dari nilai akhir dari tanggapan. Biasanya dirumuskan dalam *persentase* :

$$M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (2.39)$$

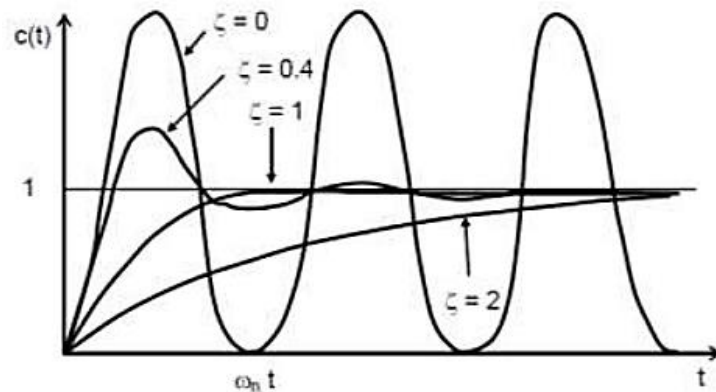
5. Waktu tunak / *settling time* (t_s) :

Tanggapan waktu tetap yang dibutuhkan untuk mencapai nilai akhir dalam *range persentase* tertentu dari nilai akhir (biasanya 5% atau 2%).

Pada karakteristik sistem kontrol kinerja yang diinginkan dari sistem harus di buat secara rinci dalam bentuk domain waktu. Pada umumnya, spesifikasi seperti ini diberikan untuk tanggapan fungsi unit *step* yang dianggap bisa mewakili kinerja sistem secara keseluruhan.

Ada nilai rasio redaman (ζ) yang bervariasi dengan kasus-kasus yang berbeda, yaitu :

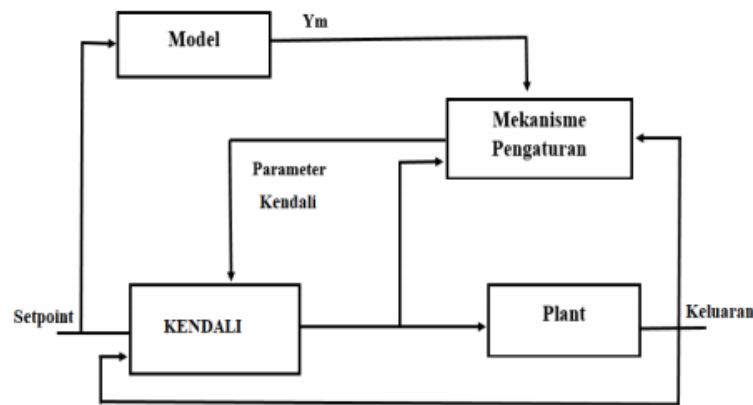
1. Untuk nilai $\zeta : 0 < \zeta < 1$, tanggapan sistem yang dihasilkan disebut tanggapan redaman kurang (*underdamped*).
2. Untuk nilai $\zeta = 1$, tanggapan sistem yang dihasilkan disebut tanggapan redaman kritis (*critically damped*).
3. Untuk nilai $\zeta > 1$, tanggapan sistem yang dihasilkan disebut tanggapan redaman lebih (*overdamped*).



Gambar 2. 7. Tanggapan Fungsi Unit-Step untuk Variasi Rasio Peredaman [19]

2.4 Model Reference Adaptive Control (MRAC)

MRAC adalah sebuah performansi keluaran model referensi yang di ikuti oleh sistem skema kendali adaptif kontrol. Parameter-parameter pengendali diatur melalui mekanisme pengaturan yang didasarkan pada *error* yang merupakan selisih antara keluaran *plant* dengan keluaran model referensi[20]. Blok diagram skema *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 8 Blok diagram skema *Model Reference Adaptive Control* [20]

Dapat dilihat pada Gambar 2.2 bahwa skema sistem MRAC terdapat dua *loop*, *Loop* pertama adalah *loop* umpan balik normal antara *output* proses dengan pengendali sedangkan *loop* kedua adalah *loop* yang digunakan untuk melakukan mekanisme pengaturan parameter pengendali. Pada *loop* kedua ini dilakukan proses untuk *update* parameter – parameter pengendali maupun parameter *plant* sesuai dengan skema adaptif yang digunakan. Dalam pelaksanaannya dilakukan dengan meminimalkan sinyal *error*, sehingga keluaran sistem (*y*) sesuai dengan keluaran model referensinya (*y_m*). Mekanisme pengaturan pada MRAC terhadap parameternya dapat dilakukan dengan metode *MIT Rule*.

2.4.1 MIT Rule

MIT Rule adalah salah satu metode yang dipakai pada MRAC selain metode kestabilan *lyapunov*. Metode *MIT Rule* dipilih karena persamaan matematis yang sedikit dan tidak terlalu rumit. Respons sistem *loop* tertutup ditentukan oleh model yang keluarannya di notasikan *y_m*, *output* proses di notasikan sebagai *y*. *Error* merupakan selisih antara keluaran *y* dari sistem *loop* tertutup dan keluaran dari model *y_m*. *Error* di notasikan sebagai *e*. Pengaturan parameter dilakukan dengan meminimalkan fungsi kerugian (*The loss function, J(θ)*) [20]:

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \quad (2.41)$$

Agar *J* kecil dilakukan perubahan parameter pada *gradient negative* dari *J* [20]:

$$\frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (2.42)$$

Dari persamaan di atas ialah aturan *MIT Rule*. Turunan parsial $\frac{d\theta}{dt}$ disebut sebagai turunan kepekaan (*sensitivity derivative*) sistem yang menunjukkan bagaimana *error* dipengaruhi

oloh parameter yang dapat diukur (*adjustable parameters*). Jika diasumsikan parameter berubah lebih lambat dari variabel lain dari sistem, $\frac{d\theta}{dt}$ di asumsika konstan.

Untuk penggunaan satu *gain* nilai *error* didefinisikan sebagai berikut :

$$e = y - y_m = kGU - k_0GU_c = kG\theta U_c - k_0GU_c \quad (2.43)$$

dengan menurunkan *error* terhadap θ , maka didapatkan

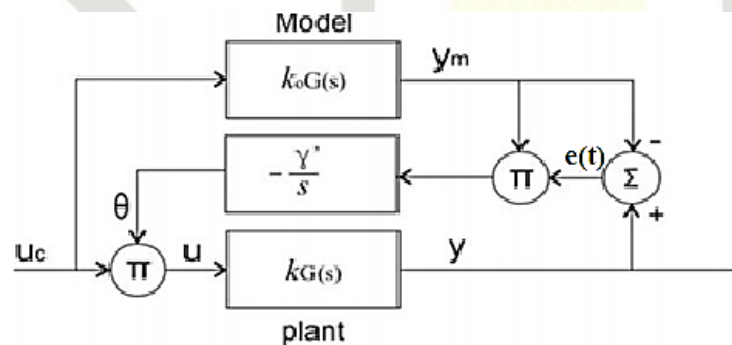
$$\frac{\partial e}{\partial \theta} = kGU_c = k \cdot \frac{y_m}{k_0} = \frac{k}{k_0} y_m \quad (2.44)$$

Terakhir *MIT Rule* diterapkan untuk *update* parameter θ sebagai berikut

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{k}{k_0} y_m = -\gamma' y_m e \quad (2.45)$$

$$\theta = \int (-\gamma' y_m e) dt \quad (2.46)$$

Dengan $-\gamma'$ adalah $-\gamma \frac{k}{k_0}$, sehingga perancangan sistem akhirnya menjadi seperti pada gambar berikut.



Gambar 2.9 Skema MRAC dengan Metode *MIT Rule* [20]

Karena respons sistem pada penelitian ini merupakan sistem orde dua maka untuk membuat model referensi menggunakan karakteristik orde dua dengan mengikuti persamaan berikut:[21]

$$y_m(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.47)$$

Besarnya nilai ζ dapat mempengaruhi respons model referensi. Nilai $\zeta < 1$ respons akan *Underdamp*, $\zeta = 1$ respons akan *Criticaldamp*, dan $\zeta > 1$ respons akan *Overdamp*.

Nilai dari ω_n dipengaruhi oleh nilai t_s . Dalam pembuatan model nilai t_s bisa ditentukan sendiri sesuai keinginan pada waktu berapa respons model mencapai daerah stabil. Untuk mendapatkan nilai t_s , pertama yang dilakukan ialah mendapatkan fungsi alih model referensi dengan menggunakan waktu *settling* dari fungsi alih *plant* yang digunakan dan mengasumsikan rasio redaman pada *plant* tersebut. Untuk mendapatkan *settling time* dari fungsi *transfer*, digunakan pengujian sistem *loop* terbuka pada perangkat lunak Matlab. *Settling time* (t_s) diperoleh dari pengujian sistem *open loop* tersebut[11]

Daerah stabil terbagi dua yaitu daerah 2% dan 5% .

Daerah 2% mengikuti persamaan

$$t_s = \frac{4}{\omega_n \zeta} \quad (2.48)$$

Daerah 5% mengikuti persamaan

$$t_s = \frac{3}{\omega_n \zeta} \quad (2.49)$$

2.5 Logika Fuzzy

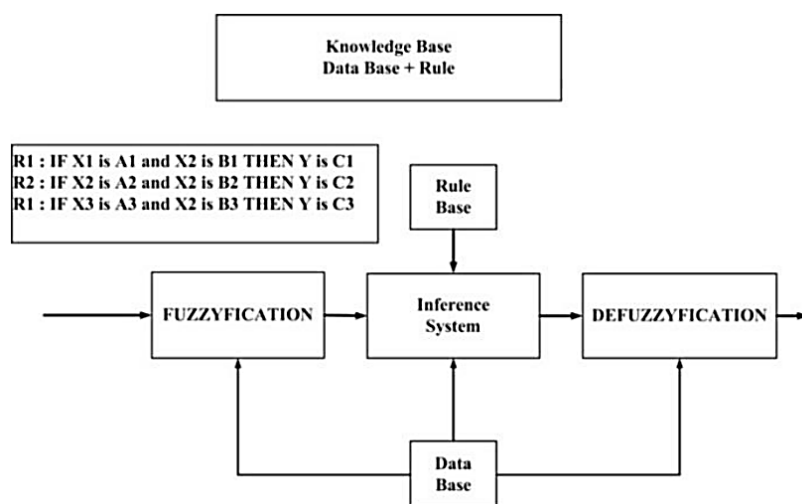
Logika atau disebut juga dengan dasar pemikiran. Logika klasik pada umumnya berkaitan dengan proposisi yang mempunyai dua kemungkinan yaitu bisa berlogika 1 (benar) atau berlogika 0. Proposisi adalah kalimat yang dinyatakan dalam suatu bahasa dan dapat diekspresikan [22]. *Fuzzy Logic* adalah sebuah pemikiran yang tidak jelas atau samar. Istilah *Fuzzy* digunakan untuk membedakan satu himpunan dengan himpunan lainnya yang berdasarkan dengan derajat keanggotaan dengan batasan yang tidak begitu jelas. Sistem *Fuzzy* adalah sistem yang menggunakan bentuk nilai *fuzzy* dan logika *Fuzzy* dalam pengaplikasiannya. Dalam proses untuk membangun sebuah sistem *Fuzzy* maka sebuah sistem *Fuzzy* memiliki bagian-bagian yaitu fuzzifikasi, mesin *interface*, *Rule* base *Fuzzy*, dan defuzzifikasi.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.



Gambar 2. 10 Tahap perancangan sistem *Fuzzy* [23]

Gambar 2.9 memperlihatkan sistem logika *fuzzy* secara umum pada bagian kiri dan sistem logika *fuzzy* secara spesifik pada bagian kanan. Dari gambar di atas, dapat disimpulkan bahwa inference *fuzzy* adalah metode yang menginterpretasi nilai pada vektor input berdasarkan beberapa kumpulan *rules*, dan menetapkan nilai pada vektor *output*. [23]

2.5.1 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi yaitu suatu proses untuk mengubah suatu masukan dari bentuk tegas (*crisp*) menjadi *Fuzzy* (variabel linguistik) yang biasanya disajikan dalam bentuk himpunan-himpunan *Fuzzy* dengan suatu fungsi keanggotaannya masing-masing. Fuzzifikasi merupakan pemetaan dari ruang *input* ke himpunan *Fuzzy* yang didefinisikan pada semesta pembicaraan variabel *input* [22]. Berikut himpunan *Fuzzy* yang sering digunakan pada proses fuzzifikasi sebagai berikut:

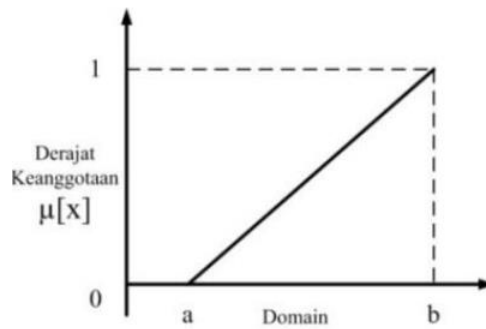
1. Representasi Linear naik, Pada himpunan ini kenaikan himpunan *Fuzzy* dimulai nilai domain pada derajat keanggotaan terendah atau 0 bergerak naik ke kanan menuju ke nilai derajat keanggotaan yang lebih tinggi [24].

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; x \leq a \\ \frac{(x-a)}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1; x \geq b \end{cases} \quad (2.50)$$

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

2.5.2 Fungsi Keanggotaan

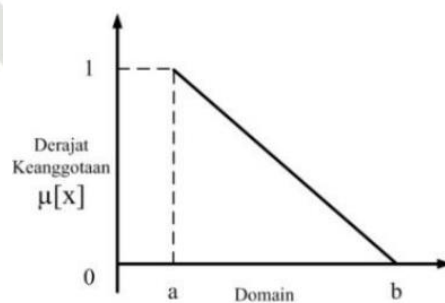
1. Diarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2. 11 Representasi Linear Naik [23]

2. Representasi Linear Turun, pada himpunan ini dimulai dari nilai domain derajat keanggotaan yang tinggi dari kiri turun secara garis lurus menurun ke nilai domain derajat keanggotaan yang lebih rendah [24].

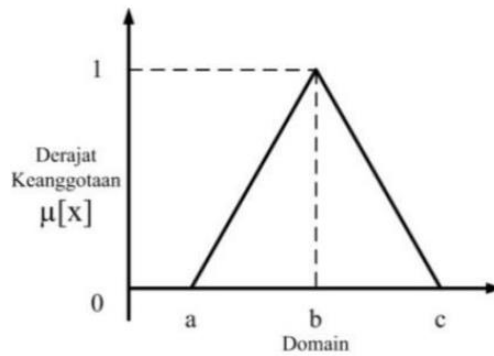
$$u_f(x) = \begin{cases} \frac{(b-x)}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (2.51)$$



Gambar 2. 12 Representasi Linear Turun [23]

3. Representasi Segitiga, Representasi segitiga adalah penggabungan antara dua garis linear [24], kurva segitiga dapat dirumuskan pada persamaan berikut:

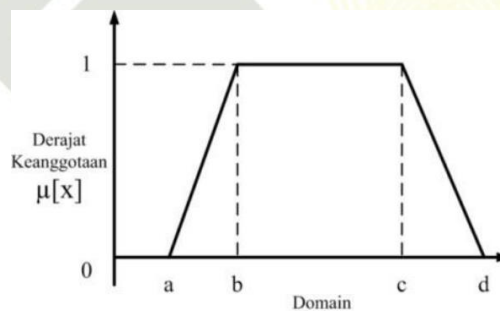
$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{for } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{for } a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{for } b \leq x \leq c \\ 0, & \text{for } x > c \end{cases} \quad (2.52)$$



Gambar 2. 13 Representasi Segitiga [23]

Representasi Trapesium, Hampir sama dengan kurva segitiga tapi yang membedakan di beberapa titik nilai keanggotaannya 1 [24].

$$\mu_f(x) = \begin{cases} 0, & \text{for } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{for } a \leq x < b \\ 1, & \text{for } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & \text{for } c \leq x \leq d \\ 0, & \text{for } x > d \end{cases} \quad (2.53)$$



Gambar 2. 14 Representasi Trapesium [23]

2.5.3 Aturan Fuzzy

Aturan kendali *Fuzzy* dinyatakan dengan kumpulan aturan *if-then* yang mana anteseden dan konsekuennya berupa variabel linguistik. Kumpulan aturan kendali *Fuzzy* tersebut merupakan relasi *input-output* dari sebuah sistem[22]. Berikut ini adalah empat metode dalam mendapatkan *rule base* sistem *fuzzy* :

1. Berdasarkan pengalaman para pakar dan pengetahuan kendali dari *engineer*, maka udhnya berdasarkan pengoperasian manual dan metode kusioner.
2. Berdasarkan aksi operator kendali, metode ini dilakukan berdasarkan pengamatan manusia dalam pengendalian untuk menentukan input dan *output*-nya.



2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

3. Berdasarkan model *Fuzzy* dari sebuah sistem, maksudnya gambaran linguistik karakter yang dinamis dari suatu proses.
4. Berdasarkan pembelajaran, metode ini merujuk pada kemampuan untuk memodifikasi aturan *Fuzzy* seperti *self-organizing*

4 Metode *Fuzzy* Mamdani

Sistem inferensi *Fuzzy* (*Fuzzy Inference System* / FIS), yaitu kerangka komputasi yang didasarkan pada teori himpunan *Fuzzy*, aturan *Fuzzy* berbentuk *if-then*, dan penalaran *Fuzzy*. Adapun langkah untuk membangun *Fuzzy* Mamdani adalah sebagai berikut:

1. Tentukan derajat kesepadanan antara himpunan *Fuzzy* dan data masukan *Fuzzy* untuk setiap variabel *input* dari setiap aturan *Fuzzy*, Hal ini sering dilakukan dengan menggunakan derajat kemiripan [25].
2. Hitung penyulutan untuk semua aturan yang dibuat mengacu pada derajat sepadanan yang telah dibuat dan penghubung (fungsi logika seperti *AND*, *OR*, dll) yang digunakan oleh variabel *input* dalam bagian premis dari aturan [25].
3. Lakukan implikasi *fuzzy* berdasarkan kuat penyulutan dan himpunan *Fuzzy* yang telah terdefinisi untuk semua variabel *input* di bagian konsekuensi dari setiap aturan. Hasil dari ini kemudian digabungkan untuk menghasilkan *output* inferensi.

Ada tiga metode yang digunakan untuk interferensi sistem *Fuzzy*:

1. Metode *Max* (*Maximum*)

Metode *Max* solusi himpunan *Fuzzy* didapatkan dengan cara nilai tertinggi dari aturan *fuzzy*, kemudian nilai tertinggi tersebut digunakan kembali untuk memodifikasi daerah *Fuzzy*, dan dilakukan aplikasi menggunakan operator *OR* ke *output* sistem, maka *output* akan berisi suatu himpunan *Fuzzy* yang merefleksikan kontribusi setiap posisi [24].

$$u_{sf}(x) \leftarrow \max(u_{sf}(x), u_{sk}(x)) \quad (2.52)$$

2. Metode *Additive* (*Sum*)

Pada metode *sum* untuk mendapatkan himpunan *Fuzzy* dengan melakukan *bounded sum* ke semua daerah *Fuzzy*[24].

$$u_{sf}(x) \leftarrow \max(1, u_{sf}(x), u_{sf}(x)) \quad (2.53)$$

3. Metode Probalistik *OR* (*Probor*)



Metode Probor untuk mendapatkan nilai himpunan *Fuzzy* dengan melakukan *product* ke semua daerah *Fuzzy* [24].

$$u_{sf}(x) \leftarrow [u_{sf}(x) + u_{kf}(x)] - [u_{sf}(x)(u_{kf}(x))] \quad (2.54)$$

2.5 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi adalah cara yang digunakan untuk mendapatkan nilai *crisp* (tegas) dari himpunan *Fuzzy*, defuzzifikasi merupakan penggambaran dari daerah aksi kendali *Fuzzy* untuk meartikan semesta pembicaraan ke daerah *non fuzzy* [22]. Adapun metode untuk defuzzifikasi pada *Fuzzy* mamdani adalah sebagai berikut:

1. Metode *Centroid*

Untuk mendapatkan nilai tegas pada metode *centroid* dengan cara mengambil nilai pusat dari daerah *Fuzzy*

$$z = \frac{\int z u(z) dz}{\int u(z) dz} \quad (2.55)$$

2. Metode *Bisector*

Untuk mendapatkan nilai tegas pada metode *bisector* dengan cara mengambil nilai pada domain *Fuzzy* yang mempunyai nilai keanggotaan setengah dari jumlah keseluruhan nilai keanggotaan di daerah *Fuzzy*.

$$= \int_p^{Rn} u(z) dz \quad (2.56)$$

3. Metode *Min of Maximum* (MOM)

Untuk mendapatkan nilai tegas pada metode MOM dengan cara mengambil nilai rata-rata dari domain yang memiliki nilai keanggotaan *maximal*.

$$= \sum_{j=i}^m \frac{z_i}{m} \quad (2.57)$$

4. Metode *Smallest of Maximum* (SOM)

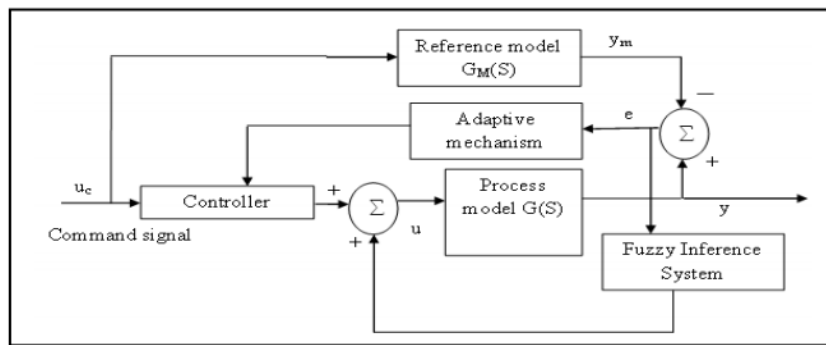
Untuk mendapatkan nilai tegas pada metode SOM dengan cara mengambil nilai rata-rata terendah dari domain yang memiliki nilai keanggotaan *maximal*.

5. Metode *Largest of Maximum* (LOM)

Untuk mendapatkan nilai tegas pada metode LOM dengan cara mengambil nilai terbesar dari domain yang memiliki nilai keanggotaan *maximal*.

Pengendali MRAC-Fuzzy

Gambar 2.10 menunjukkan blok diagram dari sistem *Fuzzy Modified MRAC* yang akan dirancang pada tugas akhir kali ini. Sistem ini memiliki *loop* tambahan yang mengumpulkan balik *error output plant* dan model melalui *fuzzy inference system*. Keluaran *fuzzy inference system* ditambahkan ke sinyal kontrol agar waktu konvergensi *output plant* dan model menjadi lebih cepat.



Gambar 2. 15 Blok Diagram *Fuzzy Modified MRAC* [26]

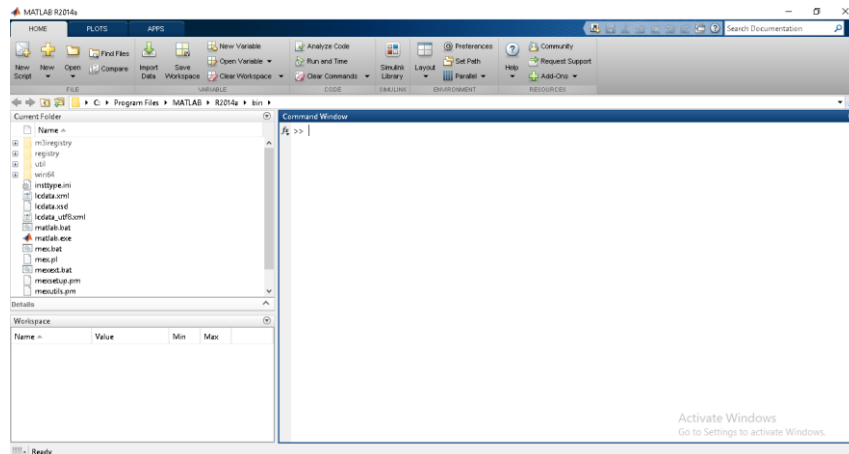
2.7 Program Matlab

Matlab merupakan singkatan dari *Matrix Laboratory* yang berarti bahasa pemrograman level tinggi dengan kinerja tinggi untuk komputasi masalah teknik. Matlab mengintegrasikan komputasi, visualisasi, dan pemrograman dalam sebuah lingkungan tunggal. Matlab memberikan sistem interaktif yang menggunakan konsep *array/matrix* sebagai variabel elemennya tanpa membutuhkan pendeklarasiannya *array*[27].

Matlab dikembangkan oleh *Mathwork* pada tahun 1970. Aplikasi matlab itu sendiri banyak digunakan dalam bidang yang membutuhkan perhitungan matematika yang rumit, dimana seluruh operasi perhitungan dalam matlab berupa operasi *matrix*. Matlab dapat menghasilkan operasi perhitungan dalam bentuk *plot* grafik dan dapat juga dirancang menggunakan *Graphical User Interface* (GUI) yang kita rancang. Pada *software* Matlab terdapat beberapa bagian penting yang digunakan dalam menjalankan program yaitu [27]:

1. *Command window* berfungsi untuk mengetik fungsi yang diinginkan.
2. *Command history* berfungsi agar yang telah digunakan sebelumnya dapat digunakan kembali.

Workspace berfungsi untuk membuat dan melihat variabel yang ada dalam matlab.



Gambar 2. 16 Tampilan Matlab

Simulink adalah sebuah aplikasi dalam Matlab untuk melakukan modeling, simulasi dan melakukan analisis dinamik pada suatu sistem[28]. Adapun program *simulink* sangat memudahkan pengguna untuk membuat suatu simulasi lebih interaktif. Pemodelan sistem diharapkan mampu mempunyai perilaku yang sangat mirip dengan sistem fisik. Jika digunakan dengan benar, maka simulasi akan membantu proses analisis dan desain sistem yang baik. Dalam perancangan pengguna dapat menggunakan blok-blok yang sesuai model matematis dari suatu sistem atau *plant*.

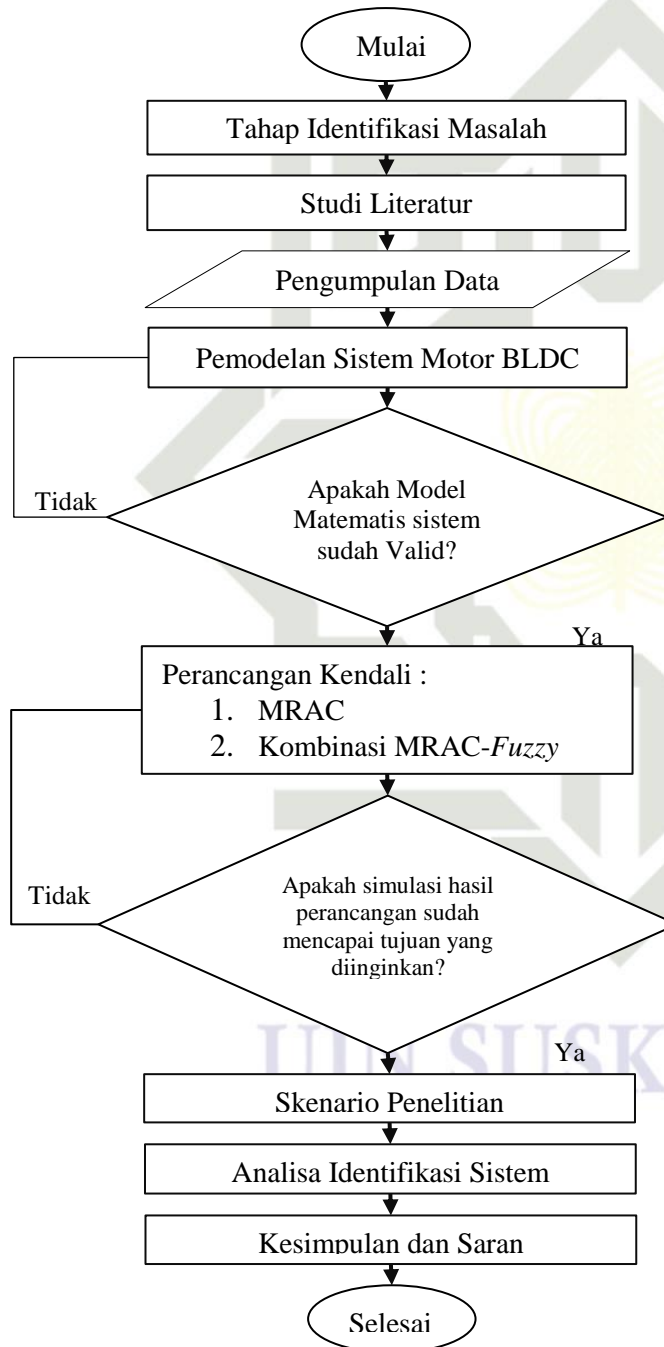
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Di larang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Di larang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

BAB III METODE PENELITIAN

Flow Chart Metode Penelitian

Dalam penelitian ini ada beberapa tahap yang penulis lakukan dalam proses perancangan pengendali metode *Hybrid* MRAC dan *Fuzzy* yang dilakukan menggunakan simulasi Matlab. Adapun tahap perancangan ini dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut ini:



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian



Tahapan – tahapan kegiatan yang digambarkan dalam *flowchart* dimulai dengan studi literatur dan diakhiri dengan analisa dan kesimpulan, untuk penjelasannya sebagai berikut:

Studi literatur

Melakukan kajian beberapa pustaka terkait baik dalam artikel penelitian yang telah dipublikasikan maupun buku yang diterbitkan mengenai pemodelan motor *brushless* DC, pengaturan kecepatan motor *brushless* DC, dan pengendali MRAC dan *Fuzzy*.

Pengumpulan data

Tahap pengumpulan data dilakukan dengan mengumpulkan data sebelum membuat desain yang akan diperlukan untuk tahap selanjutnya. Data yang diperlukan pada penelitian ini adalah nilai parameter yaitu 1 V dari rujukan penelitian ini supaya tidak melenceng dari nilai yang telah diteliti dari jurnal maupun skripsi yang sudah ada sebelumnya.

Validasi pemodelan motor *brushless* DC pada Matlab

Validasi pemodelan motor *brushless* DC adalah tahap pengujian model matematis dalam bentuk *transfer function* dari sistem yang sudah diubah ke dalam bentuk bahasa pemrograman matlab Simulink. Apakah hasil keluaran sudah sesuai dengan rujukan dengan motor *brushless*. Adapun bentuk persamaan *transfer function* adalah sebagai berikut :

$$G(s) = \frac{\frac{1}{K_e}}{\tau_m \tau_e s^2 + \tau_m s + 1}$$

Pengujian *plant* motor *brushless* DC

Pemodelan yang telah diperoleh perlu diuji dengan respons pada *plant* sebelum didesain pengendali. Hal ini dilakukan untuk mengetahui apakah pemodelan sudah sesuai dengan referensi dan apakah formulasi yang digunakan sesuai untuk sistem kendali yang akan dibuat.

5. Pemilihan pengendali

Pada tugas akhir ini dipilih pengendali MRAC dan *Fuzzy* sebagai kendali yang akan digabungkan dan akan digunakan pada pengaturan kecepatan motor *brushless* DC.

6. Membuat program simulasi untuk pengujian pengendali yang di desain yang dilakukan dengan serangkaian simulasi pengujian, seperti gangguan/*disturbance* 5 % dan 10 % dari *set point*, satuan gangguan di asumsikan sama dengan *set point* pada sistem untuk mengetahui kinerja dan ketahanan sistem.

7. Skenario Penelitian

Skenario penelitian merupakan tahap atau Langkah secara umum tentang penelitian yang dilakukan seperti melakukan pengujian terhadap sistem

8. Analisa hasil Pengujian

Melakukan analisis hasil pengujian dan mengklarifikasi hasil tersebut terhadap tujuan yang telah ditetapkan. Apabila telah memenuhi tujuan berarti penelitian telah berhasil dan apabila belum memenuhi tujuan maka perlu dikaji lebih lanjut.

9. Kesimpulan

Setelah dilakukan analisa hasil dan sesuai dengan tujuan maka penelitian yang dilakukan berhasil dan dapat ditarik kesimpulan dari hasil penelitian. Serta memberikan saran-saran yang berguna untuk dijadikan referensi penelitian selanjutnya.

3.2 Pemodelan Motor BLDC

Pada perancangan ini motor *Brushless* DC digunakan adalah type *Maxon EC flat Ø* 45 mm, berikut ini adalah spesifikasi motor yang digunakan:

Tabel 3. 1 Parameter Motor *Brushless* DC[13].

Parameter Motor Brushless DC	Value	Unit
Values at nominal voltage		
Nominal Voltage	12.0	V
No load Speed	4370	Rpm
No load Current	151	mA
Nominal Speed	2860	Rpm
Nominal Torque (max. continuous torque)	59.0	mNm
Nominal Current (max. continuous current)	2.14	A
Stall Torque	255	MNm
Starting Current	10.0	A
Maximum Efficiency	77	%
Karakteristik		
Terminal resistance phase to phase (R)	1.1	Ω
Terminal inductance phase to phase (L)	0.50	Mh
Putaran Konstan (k_t)	24.5	mNm/A
Kecepatan konstan (k_e)	35.4	rpm/V
Gradiasi kecepatan/putaran (k_0)	17.6	rpm/mNm
Mechanical time constant (k_m)	16.1	Ms
Rotor inertia (J)	82.5	gcm^2
Number of phase	3	

Berdasarkan persamaan 2.27 setelah dimasukkan nilai-nilai parameter motor *brushless* DC pada tabel 3.1 Ke dalam fungsi alih motor *brushless* DC, maka didapatkan fungsi alih motor *brushless* DC sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{\frac{1}{K_e}}{\tau_m \cdot \tau_e \cdot s^2 + \tau_m \cdot s + 1}$$

$$R = 1.1 \, \Omega$$

$$J = 82.5 \, g \, cm^2 = 8.25 \times 10^{-6} \, kg \, m^2$$

$$K_t = 24.5 \, mNm/A = 24.5 \times 10^{-3} \, Nm/A$$

$$\tau_m = 16.1 \, Ms = 0.0161 \, s$$

$$\tau_m = \frac{3 \cdot R \cdot J}{K_e K_t} = 0.0161 \, s$$

$$K_e = \frac{3 \cdot R \cdot J}{\tau_m K_t}$$

$$K_e = \frac{3 \cdot 1.1 \cdot 8.25 \times 10^{-6}}{0.0161 \cdot 24.5 \times 10^{-3}}$$

$$K_e = \frac{0.000027225}{0.00039445}$$

$$K_e = 0.06902 \, \frac{v - sec}{rad}$$

$$\tau_e = \frac{J}{3 \cdot R}$$

$$\tau_e = \frac{0.50 \times 10^{-3}}{3 \cdot 1.1}$$

$$\tau_e = 151.5 \times 10^{-6}$$

$$G(s) = \frac{\frac{1}{K_e}}{\tau_m \cdot \tau_e \cdot s^2 + \tau_m \cdot s + 1}$$

$$G(s) = \frac{0.06902}{0.0161 \cdot 151.5 \times 10^{-6} \cdot s^2 + 0.0161 \cdot s + 1}$$

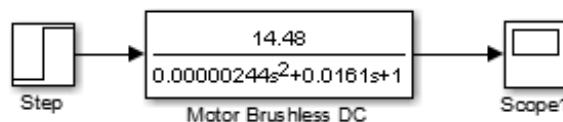
$$G(s) = \frac{14.48}{2.44 \times 10^{-6} \cdot s^2 + 0.0161 \cdot s + 1}$$

(3.1)

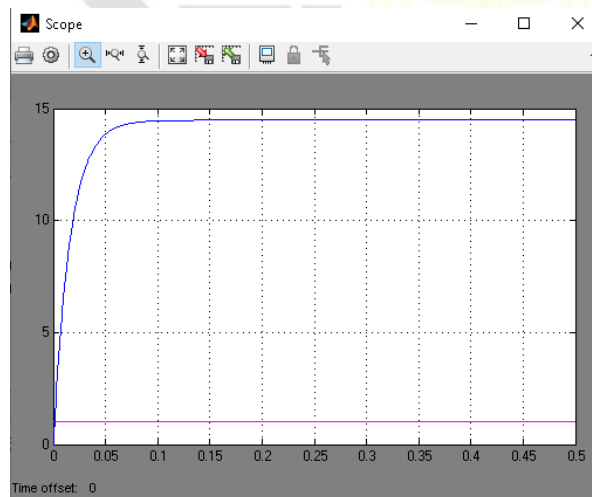
UIN SUSKA RIAU

Verifikasi Model Matematis

Pada verifikasi untuk mengetahui apakah model matematis sudah valid dapat dilakukan dengan perbandingan persamaan matematis motor *brushless* DC yang ada pada jurnal rujukan yaitu jurnal penelitian Vinod dkk [13]. Pada simulasi menggunakan perangkat lunak *Simulink* Matlab dengan waktu simulasi 0.5 detik dan *sample time* 0.03, serta nilai *set point* 1 V, penggunaan nilai *set point* merujuk dari penelitian yang dilakukan oleh Oludayo John Oguntuyinbo yang mana pada penelitiannya variabel kecepatan yang digunakan diukur dalam bentuk tegangan. Sehingga pada penelitian ini variabel yang digunakan mengikuti variabel penelitian sebelumnya, maka nilai *set point* yaitu 1 V. Blok diagram simulasi pengujian dilakukan secara *open loop* pada *plant* motor *Brushless* DC digambarkan seperti pada gambar 3.2 dan gambar 3.3 berikut ini:



Gambar 3. 2 Blok Diagram *Open Loop* Motor *Brushless* DC



Gambar 3. 3 Respons Motor *Brushless* DC *Open Loop* (Tanpa Pengendali)

Berdasarkan grafik hasil pengujian sistem tanpa pengendali diatas terlihat bahwa respons keluaran sistem stabil, namun sistem tidak dapat mengikuti nilai *set point* yang diinginkan. Pada Gambar 3.3 diatas menunjukkan nilai *set point* sebesar 1 V namun hasil respons keluaran sistem menunjukkan nilai melebihi 14,48 V dalam waktu kurang dari 1 detik untuk mencapai keadaan stabil. Untuk memverifikasi sistem dengan cara

perbandingan keluaran sistem *open loop* motor *brushless* DC Type Maxon EC Flat Ø 45 mm dengan rujukan penelitian Vinod dkk. Setelah di simulasikan secara *open loop* keluaran sistem sudah menyerupai dengan rujukan penelitian sebelumnya [13].

Perancangan Pengendali MRAC

Adapun alur perancangan kendali sebagai berikut :

Menentukan Model Matematis (*plant*)

Karakteristik dari sistem harus dipastikan, apakah sistem termasuk dalam sistem orde satu atau orde dua. Kedua sistem yang digunakan pada penelitian ini merupakan sistem orde dua.

Membuat Model Referensi

Model reference yang digunakan ialah karakteristik orde dua yang di sesuaikan dengan system *plant* yang di gunakan.

Perancangan Pengendali MRAC

Setelah membuat model referensi langkah selanjutnya yaitu merancang pengendali MRAC. Perancangan pengendali MRAC menggunakan metode MIT-Rule yang merujuk pada buku dan jurnal-jurnal penelitian dengan variasi gamma (1-2)

Setelah merancang pengendali MRAC selanjutnya menentukan nilai masing-masing *gamma* untuk mendapatkan hasil respons yang diinginkan dengan metode *heuristik*. Metode *Heuristik* merupakan sebuah metode pemecahan masalah menggunakan eksplorasi dan cara coba-coba. *Heuristik* adalah suatu aturan atau metode untuk bisa menyelesaikan solusi secara penalaan. Rancangan metode *Heuristik* ini diperoleh dengan cara perubahan parameter yang disesuaikan dengan kinerja *plant* yang akan dikendalikan. Adapun alur penentuan nilai *gain* pada MRAC sebagai berikut:

- Pertama, dengan memberi nilai *gamma* 0, dengan melihat respons sistem apakah sudah menyerupai model atau tidak.
- Jika tidak ada respons dari sistem, maka beri nilai *gamma* dengan menaikkan nilai *gain* menjadi 0.5, 5, 10, 20, 30, ... ∞ sampai terjadi perubahan pada respons system yang menyerupai model *reference*.
- Jikalau perubahan respons semakin menjauh dari model *reference*. Maka ubah nilai *gain* menjadi *negatif* ($-0.5, -5, -10, \dots \infty$) dan lanjutkan penaikan nilai *gain* sampai respons sistem menyerupai model.

Pemilihan nilai γ sangat berpengaruh terhadap hasil respons $plant$ dengan nilai γ adaptasi yang kecil menghasilkan respons $plant$ yang lambat dalam mengikuti model referensinya dan nilai γ adaptasi yang besar menghasilkan respons sistem osilasi.

3.1.1 Membuat model Referensi

Dalam perancangan pengendali MRAC digunakan skema rancangan pada gambar 3.1 dengan penentuan model referensi menggunakan metode *MIT Rule*. Karena respons sistem pada penelitian ini merupakan sistem orde dua maka untuk membuat model referensi menggunakan karakteristik orde dua dengan mengikuti persamaan 2.47 yaitu :

$$Y_m(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Untuk memperoleh nilai ω_n digunakan persamaan 2.46

$$t_s = \frac{4}{\omega_n \zeta}$$

$$\omega_n = \frac{4}{t_s \zeta} \quad (3.1)$$

$$\omega_n = \frac{4}{(0,03)(1)}$$

$$\omega_n = 133,33 \quad (3.2)$$

Dengan *settling time* sebesar 0,03 di rujuk dari penelitian Fenny Syarisda[3] pengambilan nilai *settling time* (t_s) dilakukan dengan cara simulasi *open loop* yang dimana *settling time* dari fungsi *transfer* digunakan melalui pengujian sistem *loop* terbuka pada perangkat lunak matlab diperoleh hasil $t_s = 0,03$ detik. Dengan demikian keluaran sistem harus stabil dan nilai $\zeta = 1$ dengan nilai ω_n yaitu sebesar 133,33. Agar respons model referensi menjadi *Criticaldamp*, maka fungsi alih model referensinya menjadi :

$$Y_m(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.4)$$

$$Y_m(s) = \frac{(133,33)^2}{s^2 + 2(1)(133,33) s + (133,33)^2}$$

$$Y_m(s) = \frac{17777.77}{s^2 + 266.66 s + 17777.77} \quad (3.6)$$

Selanjutnya adalah merancang pengendali MRAC dengan satu γ pada motor *Brushless DC* :



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$y_m = \frac{17777.77}{s^2 + 266.66s + 17777.77}$$

Untuk mendapatkan nilai θ digunakan persamaan 2.43 dan persamaan 2.44. Adapun penjabarannya sebagai berikut :

$$\frac{\partial e}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{k}{k_0} y_m = -\gamma' y_m e$$

$$\frac{\partial e}{\partial \theta} = -\gamma' \frac{17777.77}{s^2 + 266.66s + 17777.77} e \quad (3.7)$$

$$\theta = \frac{1}{s} - \gamma' \frac{17777.77}{s^2 + 266.66s + 17777.77} e \quad (3.8)$$

Lalu sekarang akan menggunakan aturan MIT untuk mendapatkan metode penyesuaian parameter θ ketika y_{plant} tidak diketahui dengan persamaan 2.41, adapun penjabarannya definisikan sebagai berikut :

$$e = y_{plant} - y_{model} = G_p \theta u_c - G_m u_c$$

$$y_{plant} = G_p u = \left(\frac{14.48}{2.44 \times 10^{-6} \cdot s^2 + 0.0161 \cdot s + 1} \right) (\theta u_c) \quad (3.10)$$

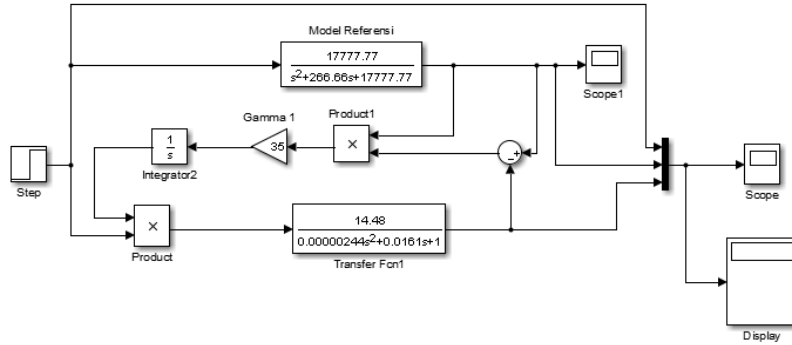
$$y_{plant} = \left(\frac{(14.48)\theta}{2.44 \times 10^{-6} \cdot s^2 + 0.0161 \cdot s + 1} \right) u_c \quad (3.11)$$

Selanjutnya adalah mencari nilai *error* dengan mengambil turunan parsial *error* dengan nilai θ . Nilai u_c tidak termasuk parameter, karena itu tidak penting saat mengevaluasi turunannya.

$$\frac{\partial e}{\partial \theta} = \left(\frac{(14.48)\theta}{2.44 \times 10^{-6} \cdot s^2 + 0.0161 \cdot s + 1} \right) u_c - G_m u_c \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \theta} = \frac{(14.48)\theta}{2.44 \times 10^{-6} \cdot s^2 + 0.0161 \cdot s + 1} u_c \quad (3.13)$$

Berdasarkan persamaan matematis yang sudah diturunkan, maka kita dapat mendesain MRAC menggunakan aplikasi matlab dengan hasil desain rangkaian diperlihatkan seperti gambar berikut :



Gambar 3. 4 Rangkaian *Simulink* Pengendali MRAC

Pada pencarian nilai *gamma* dilakukan dengan metode heuristik dengan demikian diawali dengan nilai terkecil yaitu 0,5. Pada pemberian 0,5 terjadinya perubahan respons waktu dengan mendekati model *reference* maka nilai *gamma* di variasikan sampai mendekati model sehingga didapatkanlah nilai *gamma* 35 dengan *overshoot* 0,2087 dan error 0. Adapun pencarian nilai *gamma* seperti tabel 3.2 berikut

Tabel 3. 2 Proses Penentuan Nilai *Gamma*

NO	Nilai Gamma	Rise time	Overshoot	error
1.	0,5	0,4153	-0,0221	-0,0221
2.	5	0,0522	0,1486	-0,0001
3.	10	0,0397	0,2175	-0,0004
4.	15	0,0360	0,2356	-0,0007
5.	20	0,0317	0,2358	-0,0001
6.	25	0,0312	0,2292	-0,0007
7.	30	0,0282	0,2201	-0,0005
8.	35	0,0271	0,2087	0
9.	40	0,0262	0,1970	-0,0001
10.	45	0,0267	0,1855	-0,0008

Hasil respons pengendali MRAC yang sudah dirancang diperlihatkan gambar

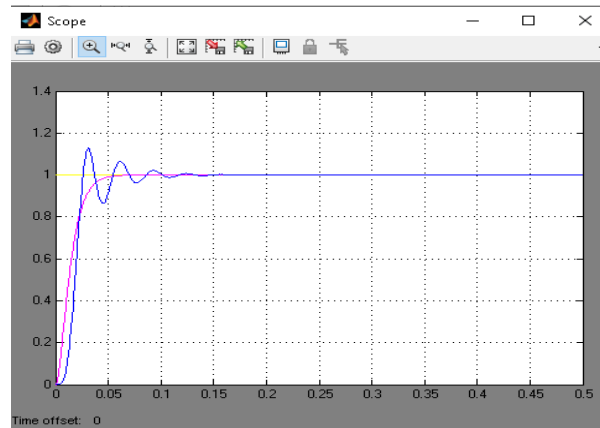
dibawah ini :

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3. 5 Hasil *Respons* MRAC Pada Motor *Brushless* DC

Pada gambar 3.5 dapat dilihat hasil respons masih terlihat adanya kekurangan, yaitu dengan keluaran *plant* masih terdapat osilasi yang mengakibatkan adanya *overshoot* pada sistem, selain itu respons belum bisa mengikuti *Y* model.

3.5 Perancangan Kendali Fuzzy Mamdani

Metode Mamdani adalah metode yang paling banyak digunakan pada dalam literatur [29]. Penulis menggunakan rule base 3X3 untuk sistem inferensi fuzzy-nya maka terdapat 5 himpunan fuzzy pada input dan output-nya yaitu nb (*negatif big*), ns (*negatif small*), z (*zero*), ps (*positif small*), pb (*positif big*). Semakin banyak partisipasi dari himpunan fuzzy pada ruang input dan output menghasilkan pendekatan yang baik terhadap sistem atau proses [22]. Variabel input dan output fuzzy penulis menggunakan 2 input yaitu *error* dan *dererror* dan satu output, untuk fungsi keanggotaan penulis menggunakan bentuk segitiga (*triangle*) dan trapesium (*trapezium*), penggunaan jenis *trapezium* adalah untuk mencari nilai rata kiri dan rata kanan, penggunaan jenis segitiga untuk menentukan nilai tengahnya. Adapun tahap perancangannya dapat dilihat sebagai berikut:

3.5.1 Fuzzifikasi

Pada proses ini, variabel linguistik diubah ke dalam bentuk himpunan Fuzzy. Variabel linguistik input Fuzzy terdiri dari *error* dan *delta error*, dimana:

$$e(t) : y_p(t) - y(t)$$

$$\Delta e(t) : e(t) - e(t - 1)$$

Lebar semesta pembicaraan untuk *error* dan *delta error* diambil dari nilai *error steady state* hasil simulasi *open loop* dari motor *brushless* DC yaitu 1 V. sedangkan untuk

Untuk rentang domain setiap himpunan ditentukan berdasarkan hipotesa berikut:

Jika fungsi keanggotaan lebih sempit, maka akan menghasilkan respons yang lebih cepat (nilai *rise time* yang kecil).

Jika fungsi keanggotaan lebih sempit, maka akan menghasilkan osilasi, *overshoot* dan *settling time* yang lebih besar. Jika fungsi keanggotaan lebih sempit, maka akan menghasilkan *steady-state error* yang lebih kecil.

Perancangan fuzzifikasi dalam pemodelan ini, adapun pada input *error* di definisikan berdasarkan *set point* yang diberikan pada *plant*, maka penulis menggunakan *error* dengan *range* [-1 1] dan untuk *delta error* dengan *range* [- 1 1] karena *plant* adalah sistem stabil maka *error* sekarang dan *error* sebelum bernilai sama, untuk *output*-nya dengan *range* [-1 1] berdasarkan keluaran *set point* yang akan diberikan pada *plant*.

3.5.2 Rule Base

Untuk mengetahui derajat keanggotaan maka dilakukan basis aturan dari sistem Fuzzy tersebut, dalam penelitian ini penulis menggunakan pendekatan *heuristik* untuk menentukan *rule base*-nya. Pendekatan heuristik adalah pendekatan yang membangun *rule base* berdasarkan pengeksplorasian pengetahuan pakar dan analisa perilaku sistem pendekatan ini perilaku sistemnya berdasarkan pengetahuan sistem secara kualitatif [22], adapun *rule base* yang penulis buat adalah:

if (error is en) and (Derror is den) then (output is un)

if (error is en) and (Derror is zero) then (output is nn)

if (error is en) and (Derror is dep) then (output is zero)

if (error is zero) and (Derror is den) then (output is un)

if (error is zero) and (Derror is zero) then (output is zero)

if (error is zero) and (Derror is dep) then (output is up)

if (error is ϵ_p) and (Derror is den) then (output is zero)

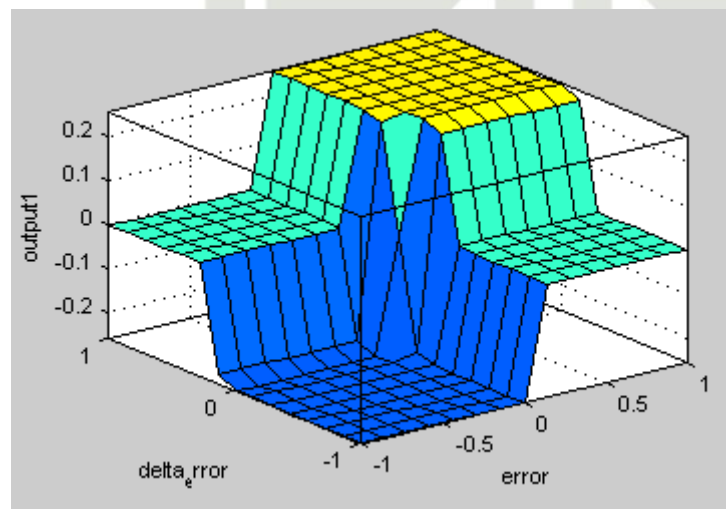
if (error is ep) and (Derror is zero) then (output is up)

if (error is ep) and (Derror is dep) then (output is up)

Tabel 3.3 Rule Base Fuzzy

	Den	Zero	Dep
Den	Un	Un	Zero
Zero	Un	Zero	Up
Ep	Zero	Up	Up

Gambar untuk surface dari rule base Fuzzy diatas:



Gambar 3. 6 Viewer Surface Pengendali Fuzzy

3.5.3 Defuzzifikasi

Pada penelitian ini penulis menggunakan metode *Centroid*, karena dari beberapa metode defuzzifikasi metode ini lebih cocok digunakan untuk *Plant* kecepatan motor *Brushless* DC. Proses penentuan lebar fungsi keanggotaan, pertama-tama penulis menentukan lebar fungsi keanggotaan pada nilai tengah yaitu *e*, *de*, dan *u*. Mula mula semua fungsi keanggotaan diatur dengan titik perpotongan berada di titik derajat keanggotaan 0,5. Kemudian penulis memperkecil lebar fungsi keanggotaan hingga didapatkan respons yang terbaik. Respons keluaran sistem dengan berbagai rentang fungsi keanggotaan dapat dilihat pada Tabel dibawah ini.

Tabel 3.4 Proses menentukan lebar fungsi keanggotaan e , De , dan u

	Lebar fungsi keanggotaan			Rise time	Overshoot	error
	Error (e)	Delta error (de)	Output (u)			
1.	[-0.5 0 0.5]	[-0.5 0 0.5]	[-0.2 0 0.2]	0,02954	0,00541	-0,00062
2.	[-0.075 0 0.075]	[-0.125 0 0.125]	[-0.075 0 0.075]	0,02940	0,00035	-0,00047
3.	[-0.075 0 0.075]	[-0.25 0 0.25]	[-0.125 0 0.125]	0,02933	0,00127	-0,00069
4.	[-0.075 0 0.075]	[-0.1 0 0.1]	[-0.15 0 0.15]	0,02932	0,00032	-0,00109
5.	[-0.075 0 0.075]	[-0.2 0 0.2]	[-0.125 0 0.125]	0,02934	0,00038	-0,00078
6.	[-0.125 0 0.125]	[-0.125 0 0.125]	[-0.125 0 0.125]	0,02942	0,00377	-0,00052
7.	[-0.125 0 0.125]	[-0.2 0 0.2]	[-0.125 0 0.125]	0,02941	0,00164	-0,00102
8.	[-0.2 0 0.2]	[-0.15 0 0.15]	[-0.12 0 0.12]	0,02936	0,00462	-0,00103
9.	[-0.15 0 0.15]	[-0.25 0 0.25]	[-0.1 0 0.1]	0,38037	0,00828	-0,00128
10.	[-0.2 0 0.2]	[-0.3 0 0.3]	[-0.125 0 0.125]	0,02955	0,00325	-0,00167

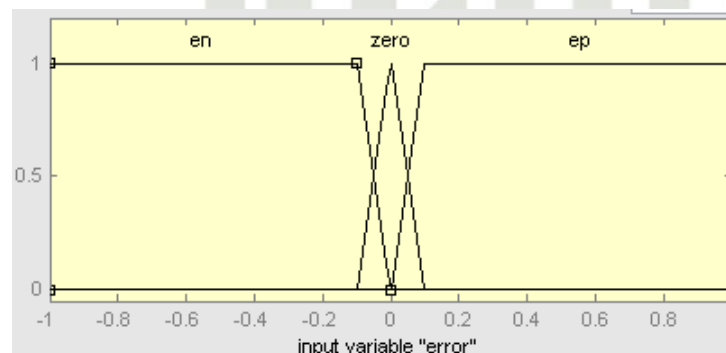
Selanjutnya penulis menentukan lebar fungsi keanggotaan pada batas kiri dan kanan. Respons sistem berdasarkan perubahan lebar fungsi keanggotaan dapat dilihat pada Tabel dibawah ini.

Tabel 3.5 proses menentukan lebar fungsi keanggotaan $e(+)$, $e(-)$, $De(+)$, $De(-)$, B dan K

NO	Lebar fungsi keanggotaan			Rise time	overshoot	error
	Error(+)	Delta error(+)	B			
	Error(-)	Delta error(-)	K			
1.	[0 0.2 1 1]	[0 0.4 1 1]	[0 0.2 1 1]	0,0294	0,0003	-0,0004
	[-1 -1 -0.2 0]	[-1 -1 -0.4 0]	[-1 -1 -0.2 0]			
2.	[0 0.2 1 1]	[0 0.3 1 1]	[0 0.125 1 1]	0,02948	0,0018	-0,0006
	[-1 -1 -0.15 0]	[-1 -1 -0.3 0]	[-1 -1 -0.125 0]			
3.	[0 0.1 1 1]	[0 0.45 1 1]	[0 0.125 1 1]	0,0293	0,0009	-0,0004

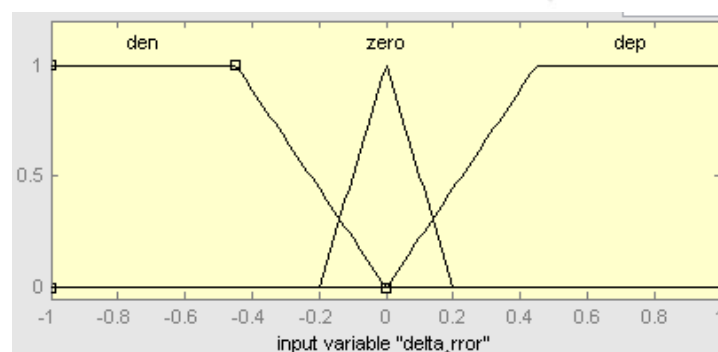
	[-1 -1 -0.1 0]	[-1 -1 -0.45 0]	[-1 -1 -0.125 0]			
4.	[0 0.1 1 1]	[0 0.3 1 1]	[0 0.2 1 1]	0,02940	0,0016	-0,0007
	[-1 -1 -0.1 0]	[-1 -1 -0.3 0]	[-1 -1 -0.2 0]			
5.	[0 0.25 1 1]	[0 0.2 1 1]	[0 0.125 1 1]	0,02955	-0,0003	-0,0014
	[-1 -1 -0.25 0]	[-1 -1 -0.2 0]	[-1 -1 -0.125 0]			

Berdasarkan Tabel 3.2 dan 3.3 didapatkan rentang Tiap-tiap fungsi keanggotaan untuk perancangan *fuzzy* sebagai berikut.



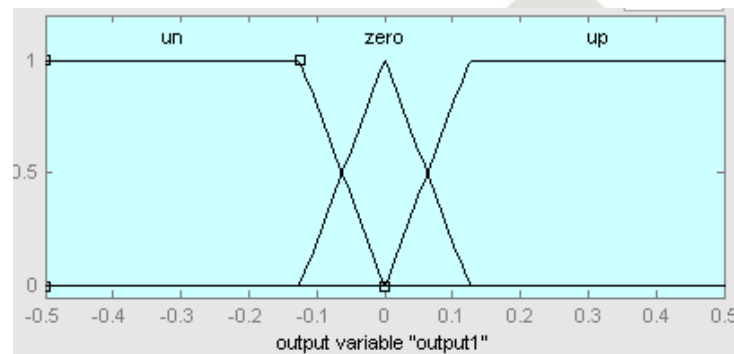
Gambar 3. 7 Fungsi Keanggotaan *Error*

Gambar diatas merupakan fungsi keanggotaan *error* yang mana penulis menggunakan fungsi keanggotaan yang sempit yang bertujuan untuk menghasilkan *rise time* yang lebih cepat akan tetapi apabila terlalu sempit membuat sistem berosilasi [22]. Fungsi Keanggotaan en dan ep berbentuk *trapezium* yang terletak pada rentang [-1 -1 -0.1 0] dan [0 0.1 1 1], fungsi keanggotaan *zero* berbentuk segitiga yang terletak pada rentang [-0.075 0 0.075].



Gambar 3. 8 Fungsi Keanggotaan *Derror*

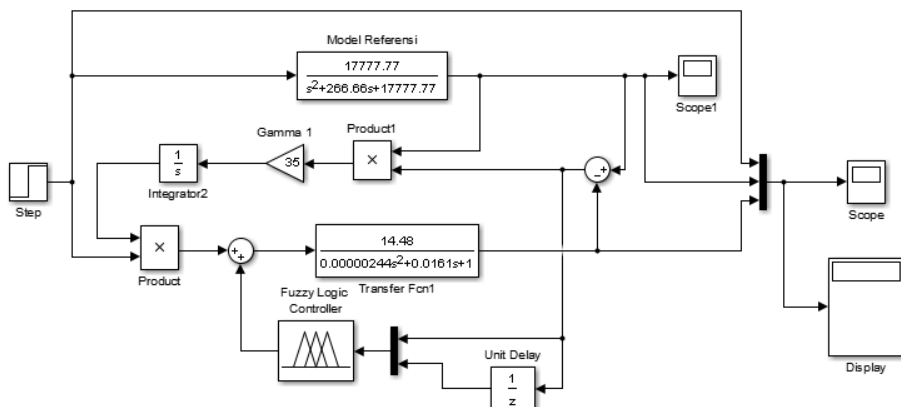
Gambar diatas merupakan fungsi keanggotaan *derror* yang mana penulis menggunakan fungsi keanggotaan yang lebih sempit dari *error* karena di fungsi keanggotaan *derror* tidak terlalu sempit maka pada *derror* bisa dipersempit lagi tujuannya untuk mempercepat *rise time* dan *error steady stade* yang lebih kecil [22]. Fungsi keanggotaan *den* dan *dep* berbentuk *trapezium* yang terletak pada rentang [-1 -1 -0.45 0] dan [0 0.45 1 1], fungsi keanggotaan *zero* berbentuk segitiga yang terletak pada rentang [-0.0.2].



Gambar 3. 9 Fungsi Keanggotaan *Output*

Penentuan fungsi keanggotaan *output* merupakan prioritas yang pertama dari sistem *Fuzzy* karena memiliki pengaruh yang besar dalam hal stabilitas dan osilasi sistem, maka penulis menggunakan fungsi keanggotaan pada umumnya yaitu mengambil di titik *crossover* 0 [22] mengambil nilai tengah bertujuan agar sistem lebih stabil. Fungsi keanggotaan *un* dan *up* berbentuk *trapesium* yang terletak pada rentang [-1 1 -0.125 0] dan [0 0.125 1 1], fungsi keanggotaan *zero* berbentuk segitiga yang terletak pada rentang [-0.125 0 0.125].

3.6 Perancangan Pengendali MRAC - *Fuzzy*



Gambar 3. 10 Rangkaian Simulink Pengendali MRAC – *Fuzzy*

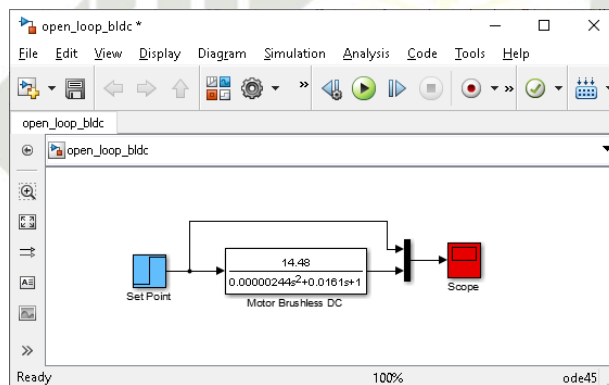
Gambar 3.10 di atas merupakan rancangan penambahan pengendali *Fuzzy* pada sistem motor *Brushless* DC dengan menghubungkan seri antara *transfer function* sistem motor *Brushless* DC dengan pengendali *Fuzzy* kedalam rangkaian. Kendali *fuzzy* digunakan untuk memperbaiki dari performa *transien* dari MRAC.

Hasil Data Penelitian yang Akan Diambil

3.1 Grafik dari Setiap Pengujian Sistem

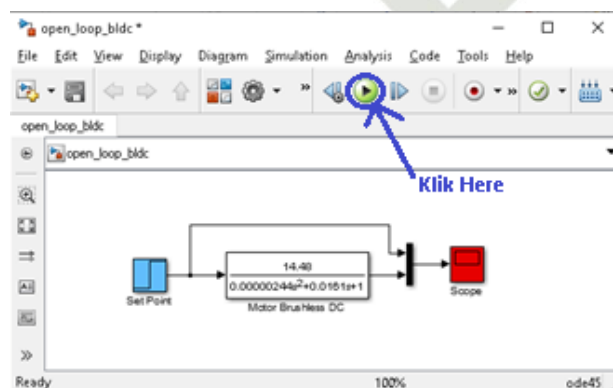
Grafik yang akan di ambil yaitu berdasarkan simulasi sistem secara *open loop*, menggunakan pengendali MRAC, pengendali MRAC dengan penambahan pengendali *Fuzzy* dan pengendali MRAC-*Fuzzy* dengan adanya gangguan sinyal. Tahapan yang akan dilakukan adalah sebagai berikut :

Akan dilakukan pengujian pada setiap pengendali yang sudah di rancang secara simulasi, contoh seperti gambar di bawah ini :



Gambar 3. 11 Contoh Pengujian Secara Simulasi

Kemudian rancangan simulasi di *Run*

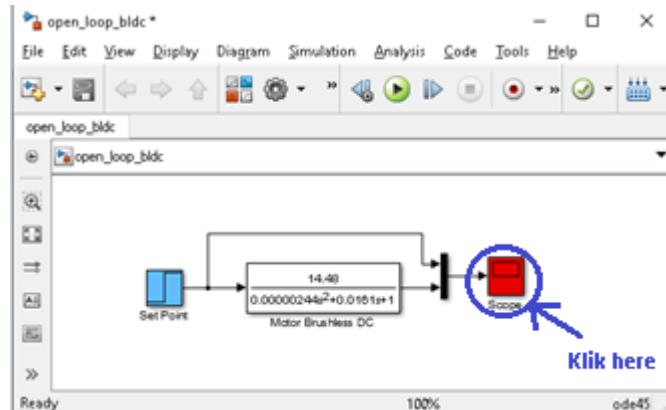


Gambar 3. 12 Contoh Menjalankan Simulasi

Untuk melihat hasil simulasi *double* klik pada blok *Scope*

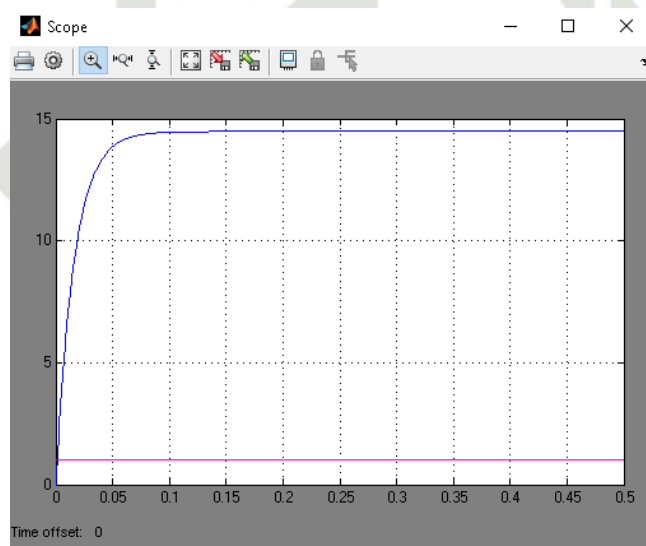
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3. 13 Contoh Menampilkan Grafik Keluaran Sistem

kemudian akan timbul grafik keluaran respons sistem dari rancangan simulasi seperti gambar berikut :



Gambar 3. 14 Contoh Tampilan Grafik Pada Scope

Hasil dari grafik tersebut akan di analisa respons sistemnya.

3.7.2 Respons Transient Sistem dari Setiap Pengujian

Pada penelitian ini akan di ambil data respons transient dari setiap pengujian meliputi:

1. Waktu Tunak/ Rise Time (t_r)

Pada penelitian ini waktu naik yang digunakan yaitu 10% sampai 90%, dimana waktu ini diperoleh dengan mencari selisih waktu dari kondisi respons saat 90% dengan kondisi respons saat 10% dari *set point*.

Waktu Tunak/ *Time settling* (t_s)

Pada penelitian ini ukuran waktu yang digunakan yaitu ukuran waktu yang menyatakan respons telah masuk $\pm 2\%$ dari keadaan *steady state*.

Waktu tunda / *Delay time* (t_d)

• Ukuran waktu yang menyatakan faktor keterlambatan respons output terhadap input, diukur mulai dari $t=0$ sampai dengan respons 50% dari respons *steady state*

Maximum Overshoot (M_P)

Nilai puncak kurva tanggapan diukur dari satuan.

Error Steady State (E_{ss})

Selisih nilai *set point steady state* dan nilai *output steady state* yang terukur dengan nilai yang sebenarnya

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



BAB V PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa dapat disimpulkan bahwa pengendali kombinasi MRAC-fuzzy untuk mengendalikan kecepatan motor *Brushless* DC berdasarkan tegangan yang masuk. Penambahan kendali MRAC memiliki respons yang cepat dan dapat mengurangi *error steady state* yang minimum yaitu 0,0011 V namun masih memiliki *overshoot* sebesar 20,87 %, Setelah MRAC dikombinasi dengan *Fuzzy* terjadi lambatnya respons waktu namun tidak pada waktu *delay* yang lebih cepat sebesar 0,0126 detik dan *overshoot* yang mengecil menjadi 0,15%. Saat diberi gangguan 10% dari *set point* pada pengendali MRAC kombinasi *Fuzzy* mampu stabil menuju *set point* dengan respon waktu yang cepat serta sistem dapat dikatakan kokoh terhadap *disturbance*/gangguan.

5.2 Saran

Pada penelitian yang sudah dilakukan, pengendali MRAC menggunakan *MIT Rule*. Sehingga untuk penelitian selanjutnya penulis menyarankan menggunakan metode kestabilan *Lyapunov*, apakah akan mendapatkan hasil yang lebih baik dari penelitian ini dengan menggunakan turunan *plant* dari Vinod dan Pandey. Peneliti juga menggunakan metode *heuristik* pada pengendali *Fuzzy mamdani* sehingga cukup memakan waktu saat mencari parameter himpunan *fuzzy*, disarankan untuk kedepannya bisa menggunakan kendali *fuzzy sugeno* dengan proses tuning PID atau kendali lainnya.

UIN SUSKA RIAU

DAFTAR PUSTAKA

1. Xia, "Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls," 2012.
2. Nurliana, *Simulation of Speed Control Brushless DC Motor Using Gaussian Fuzzy Logic Controller*. Courier Corporation, 2014.
3. F. Syarisda, "Perancangan Pengendali Model Reference Adaptive Control (MRAC) Kombinasi PID untuk Mengendalikan Kecepatan Pada Brushless Direct Current (BLDC) Motor," *Jur. Tek. Elektro UIN Suska Riau*, 2018.
4. T. M.S. and K. S. George, "Speed Control of Brushless DC Motor Using Model Reference Adaptive Control," *Dept. EEE, Mar Baselios Coll. Eng. Technol. Thiruvananthapuram, Kerala, India*, vol. 6, no. 5 May, 2017.
5. M. Y. Hassan, "Adaptive Control," *Control Sytems Eng. Dep. Univ. Technol. Iraq*, pp. 1–58.
6. N. Yulianto, "Desain Sistem Pengendali Kecepatan Motor Brushless DC (BLDC) Menggunakan Pengendali Hybrid Logika Fuzzy – PID," *Jur. Tek. Elektro UIN Suska Riau UIN Suska Riau*, 2018.
7. R. Mulyadi, "Perancangan Pengendali Kecepatan Motor Brushless DC Menggunakan Pengendali Hybrid SMC Dan PID Dengan Metode Heuristik," *Jur. Tek. Elektro UIN Suska Riau*, 2018.
8. A. Faizal and Harman, "Analisa Performansi Pengendali pada Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Metode Harriot Dengan Pengendali Hybrid SMC dan PID," *Jur. Tek. Elektro UIN Suska Riau*, 2017.
9. H. Samsul Bachri M., "Sistem Kendali Hybrid PID - Logika Fuzzy Pada Pengaturan Kecepatan Motor DC," *Jte*, vol. 8, no. 2, pp. 25–34, 2004.
10. Samuel M. Smith and David J. Comer, "Automated Calibration of a fuzzy Logic Controller Using a Cell State Space Algorithm," 1991.
11. A. A. M. H. Mahdi, W. S. I. W. Salim, and K. H. M. Farhan, "Fuzzy model reference adaptive controller for position control of a dc linear actuator motor in a robotic vehicle driver," *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 12, no. 3, pp. 235–244, 2020, doi: 10.30880/ijie.2020.12.03.027.



2. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

K. Huberman and A. Muttaqien, "Sistem Kendali Kecepatan Motor DC Magnet Permanen dengan Metode Logika Fuzzy Berbasis Mikrokontroler," *Univ. Telkom Bandung*, 2014.

A. K. P. Vinod KR Singh, "Modeling and Performance Analysis of PID Controlled BLDC Motor and Different Schemes of PWM Controlled BLDC Motor," vol. 3, no. 4, pp. 1–14, 2013.

K. Refiana, "Desain Kendali MRAC Dengan Kombinasi PID Untuk Mengendalikan Kecepatan Pada Sistem Motor DC," 2018.

dan S. Muhammad Rifki Fajrianto, Wahyudi, "Perancangan Kontroler Fuzzy Model Reference Learning Control (FMRLC) Berbasis Mikrokontroler ATMEGA16 sebagai Kendali Motor Brushless DC," *Dep. Tek. Elektro Univ. Diponegoro Semarang*, vol. Vol.6.No.4, 2017.

M. Azzumar, "Pemodelan dan Desain Kendali Sistem Aktuator Kendali Sirip Bebas Brushless DC Motor," *Fak. Tek. Elektro, Univ. Indones.*, 2012.

A. Dharmawan, "Pengendalian Motor Brushless DC Dengan Metode Pwm Sinusoidal Menggunakan Atmega16," *Fak. Tek. Dep. Tek. Elektro Depok*, 2009.

O. J. Oguntoyinbo, *PID Control of Brushless DC Motor and Robot Trajectory Planning and Simulation With Matlab/Simulink*. 2009.

K. Ogata, "Modern Control Engineering Fourth Edition," *Aeeizh, Univ. Minnesota*, 2002.

K. J. A. and B. Wittenmark, "Adaptive Control." 2nd ed., Dover Publications, New York, 1995.

K. Ogata, *Teknik Kontrol Automatik*, Jilid 1. Erlangga, 1995.

D. A. R. Wati, *Sistem Kendali Cerdas*. Yogyakarta: Garaha Ilmu, 2011.

Agung Setiawan, B. Yanto, and K. Yasdomi, "Logika Fuzzy Dengan Matlab," *Jayapangus Press Bali, Indones.*, 2018.

S. Kusumadewi, *Analisis Desain Sistem Fuzzy Menggunakan Toolbox Matlab*, Edisi Pert. Yogyakarta, Indonesia: Graha Ilmu, 2002.

T. S. Widodo, *Sistem Neuro Fuzzy*, Edisi Pert. Yogyakarta, Indonesia: Graha Ilmu,



2002.

[27] K. A. Mohideen and K. Valarmathi, "Fuzzy modified model reference adaptive controller for improved transient response," *Int. Conf. Power, Energy Control. ICPEC*, pp. 454–457, 2013, doi: 10.1109/ICPEC.2013.6527699.

[28] B. Cahyono, "Penggunaan Software Matrix Laboratory (Matlab) dalam Pembelajaran Aljabar Linier," *Fak. Ilmu Tarb. dan Kegur. Insitut Agama Islam Negeri Walisongo*, 2013.

[29] M. Kadaffi, "Penerapan Simulink Untuk Simulasi," *Fak. Tek. Ind. Univ. Mercu Buana Jakarta*, 2011.

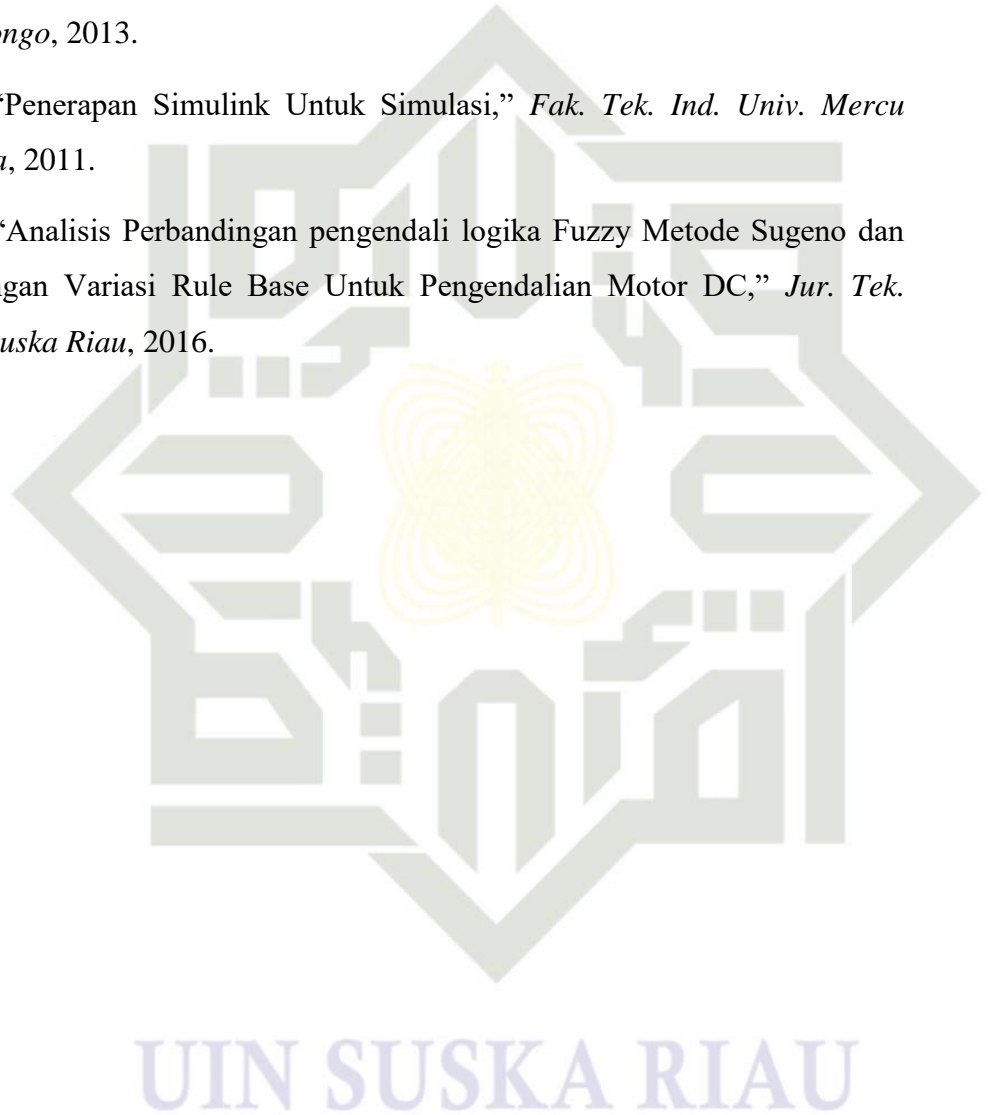
[30] G. Maulana, "Analisis Perbandingan pengendali logika Fuzzy Metode Sugeno dan Mamdani dengan Variasi Rule Base Untuk Pengendalian Motor DC," *Jur. Tek. Elektro UIN Suska Riau*, 2016.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

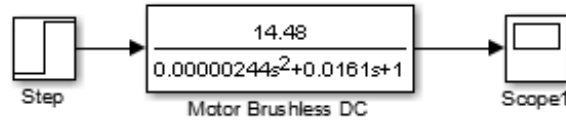
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

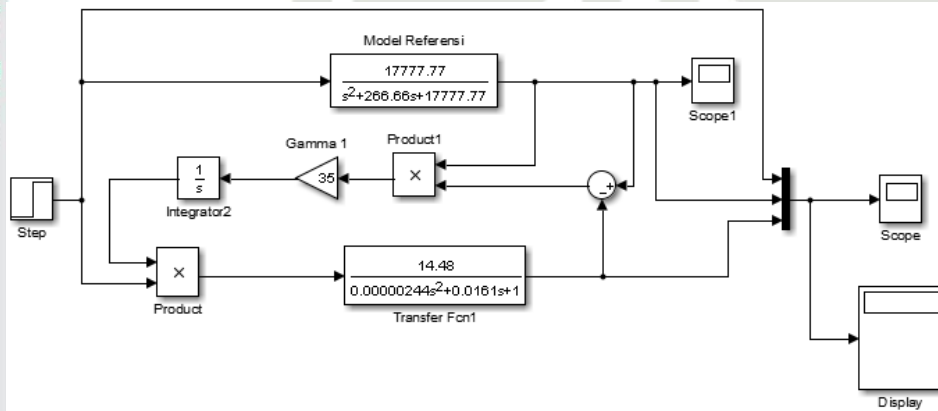


LAMPIRAN A

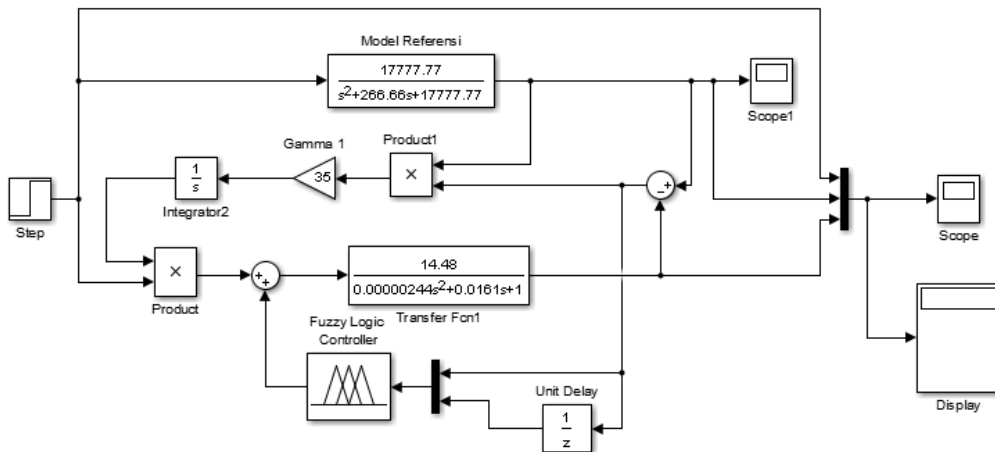
Blok diagram *simulink open loop* motor *brushless* DC



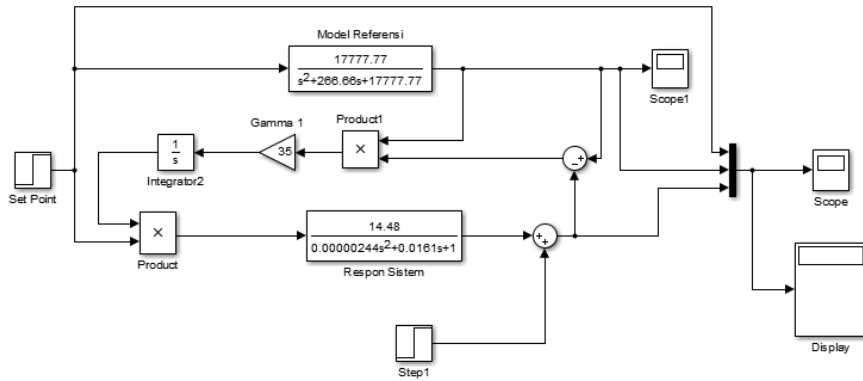
Blok diagram *simulink* pengendali MRAC pada pengaturan kecepatan pada motor *brushless* DC



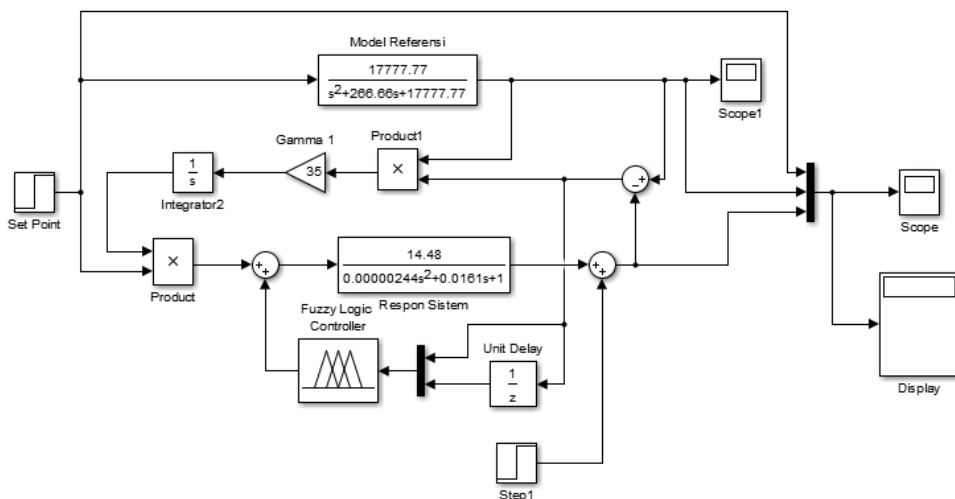
Blok diagram *simulink* pengendali MRAC – *Fuzzy* pada pengaturan kecepatan motor *brushless* DC



4. Blok diagram *simulink* gangguan pengendali MRAC pada pengaturan kecepatan pada motor *brushless* DC



Blok diagram *simulink* gangguan pengendali MRAC-Fuzzy pada pengaturan kecepatan pada motor *brushless* DC



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

4. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

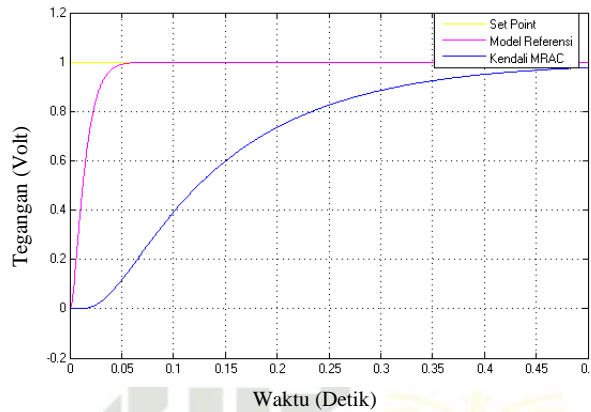
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

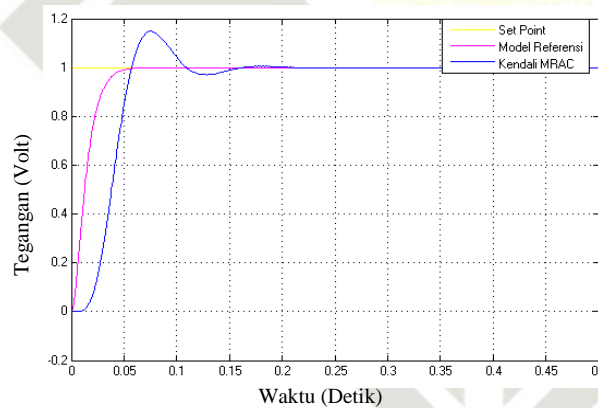
LAMPIRAN B

PROSES TUNNING NILAI GAMMA (γ) PADA PENGENDALI MRAC DENGAN METODE TRIAL AND ERROR UNTUK MENGENDALIKAN KECEPATAN PADA MOTOR BRUSHLESS DC

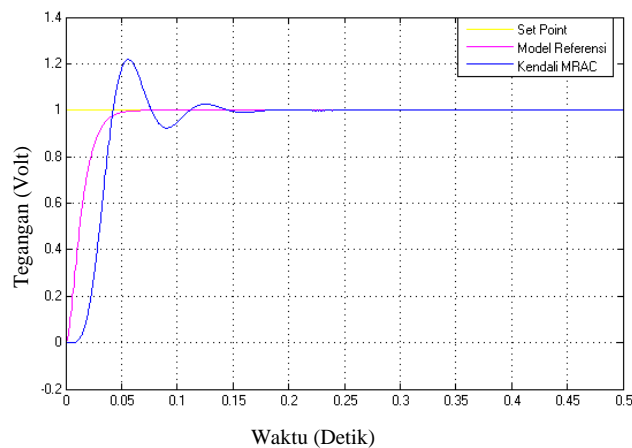
Hasil Simulasi Pengendali MRAC dengan $\gamma = 0,5$



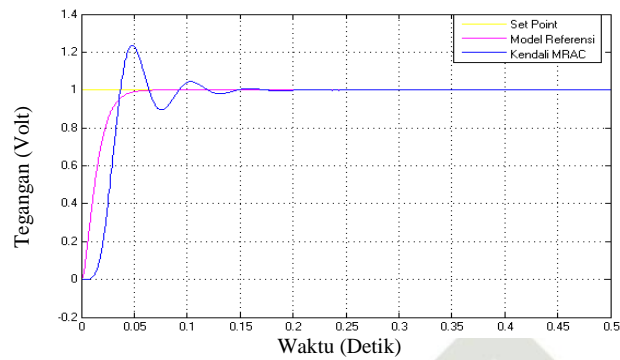
Hasil Simulasi Pengendali MRAC dengan $\gamma = 5$



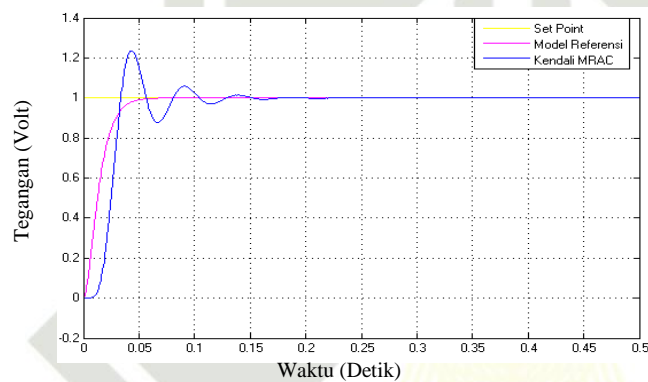
Hasil Simulasi Pengendali MRAC dengan $\gamma = 10$



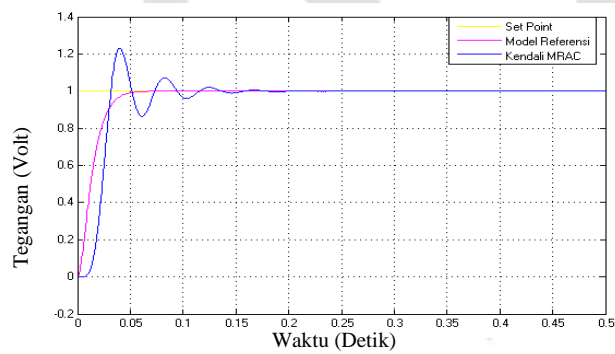
4. Hasil Simulasi Pengendali MRAC dengan $\gamma = 15$



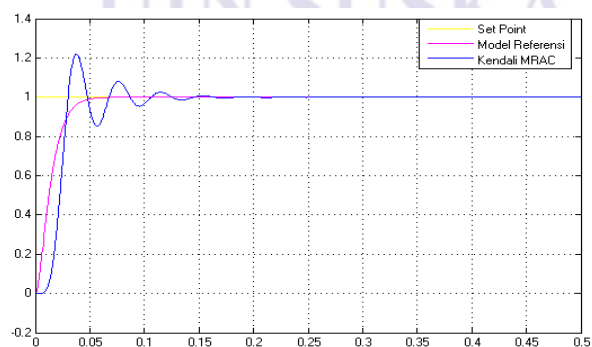
5. Hasil Simulasi Pengendali MRAC dengan $\gamma = 20$



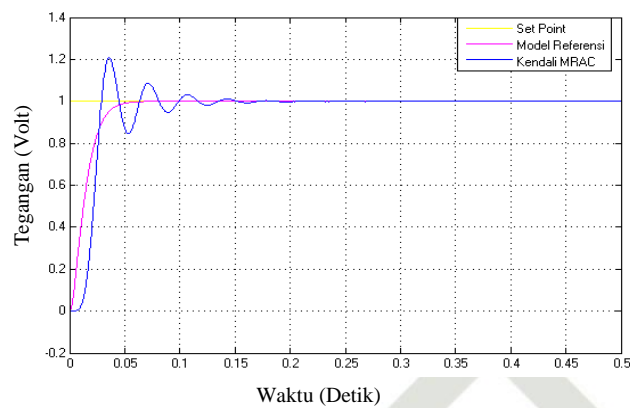
6. Hasil Simulasi Pengendali MRAC dengan $\gamma = 25$



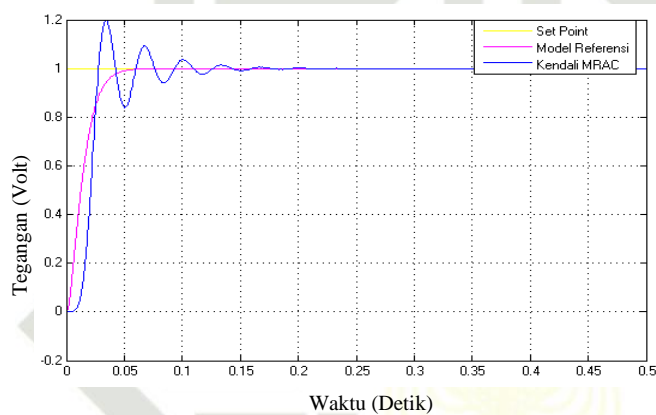
7. Hasil Simulasi Pengendali MRAC dengan $\gamma = 30$



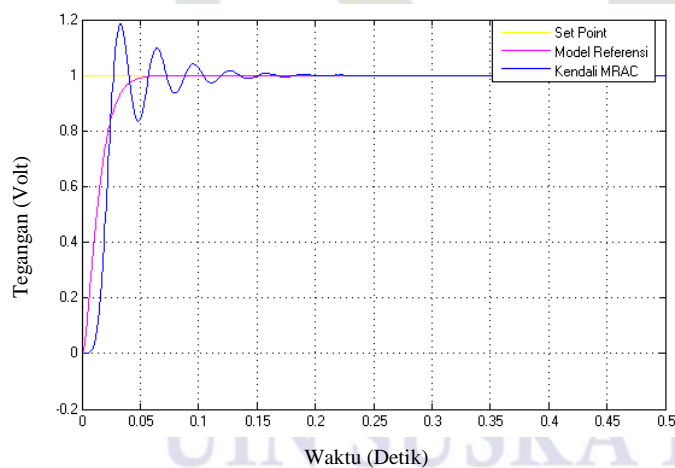
8. Hasil Simulasi Pengendali MRAC dengan $\gamma = 35$



9. Hasil Simulasi Pengendali MRAC dengan $\gamma = 40$



10. Hasil Simulasi Pengendali MRAC dengan $\gamma = 45$



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Diarangi mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

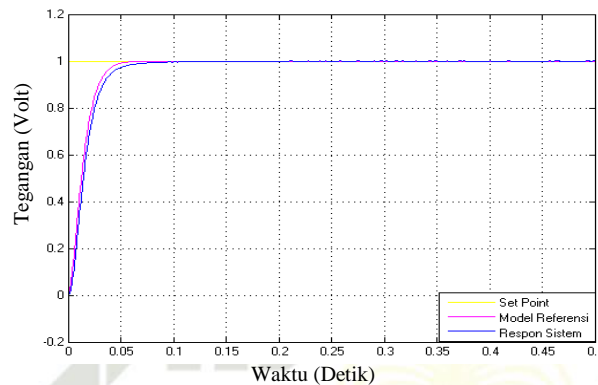


LAMPIRAN C

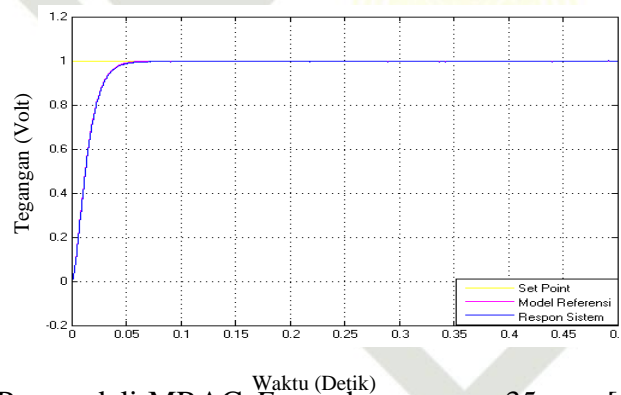
PROSES TUNNING NILAI GAMMA (γ) PADA PENGENDALI MRAC-FUZZY DENGAN METODE TRIAL AND ERROR UNTUK MENGENDALIKAN KECEPATAN PADA MOTOR BRUSHLESS DC

A. Proses Menentukan Lebar Fungsi Keanggotaan e, De dan u

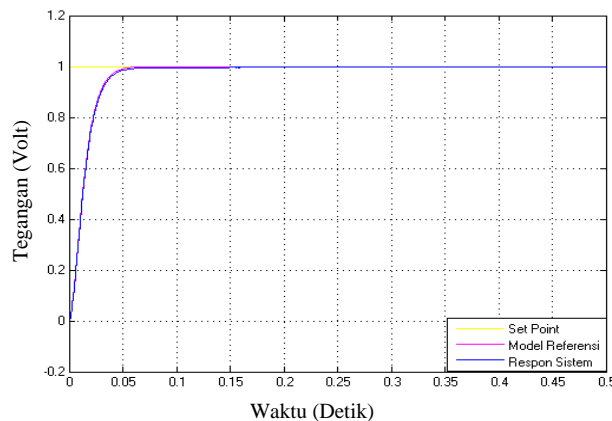
1. Hasil Simulasi Pengendali MRAC-Fuzzy dengan $\gamma = 35$, $e = [-0.5 \ 0 \ 0.5]$, $De = [-0.5 \ 0 \ 0.5]$ dan $u = [-0.2 \ 0 \ 0.2]$



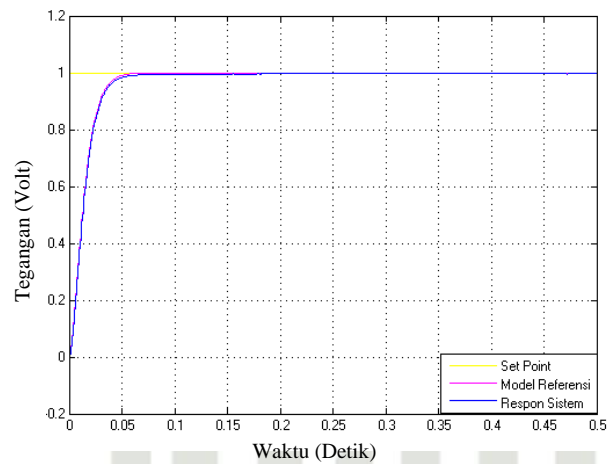
2. Hasil Simulasi Pengendali MRAC-Fuzzy dengan $\gamma = 35$, $e = [-0.075 \ 0 \ 0.075]$, $De = [-0.125 \ 0 \ 0.125]$ dan $u = [-0.075 \ 0 \ 0.075]$



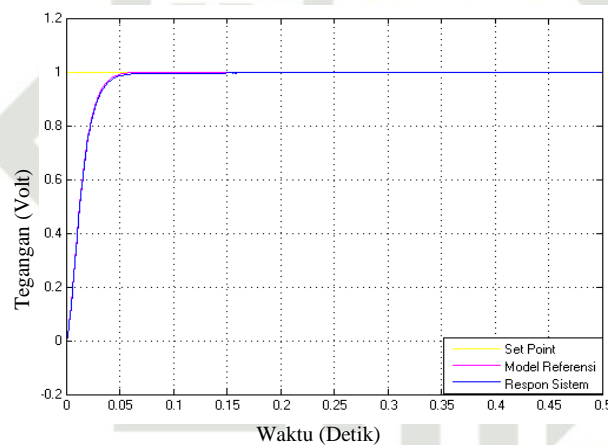
3. Hasil Simulasi Pengendali MRAC-Fuzzy dengan $\gamma = 35$, $e = [-0.075 \ 0 \ 0.075]$, $De = [-0.25 \ 0 \ 0.25]$ dan $u = [-0.125 \ 0 \ 0.125]$



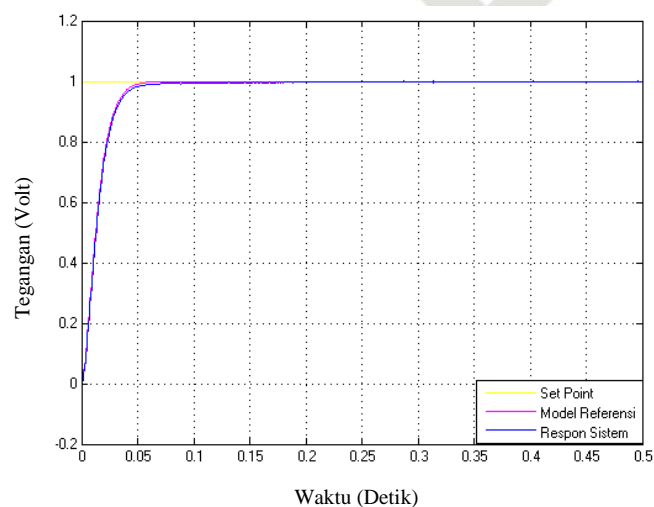
4. Hasil Simulasi Pengendali MRAC-Fuzzy dengan $\gamma = 35$, $e = [-0.075 \ 0 \ 0.075]$, $D_e = [-0,1 \ 0 \ 0,1]$ dan $u = [-0.15 \ 0 \ 0,15]$



5. Hasil Simulasi Pengendali MRAC-Fuzzy dengan $\gamma = 35$, $e = [-0.075 \ 0 \ 0.075]$, $D_e = [-0,2 \ 0 \ 0,2]$ dan $u = [-0.125 \ 0 \ 0,125]$



6. Hasil Simulasi Pengendali MRAC-Fuzzy dengan $\gamma = 35$, $e = [-0.2 \ 0 \ 0.2]$, $D_e = [-0,15 \ 0 \ 0,15]$ dan $u = [-0.12 \ 0 \ 0,12]$



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

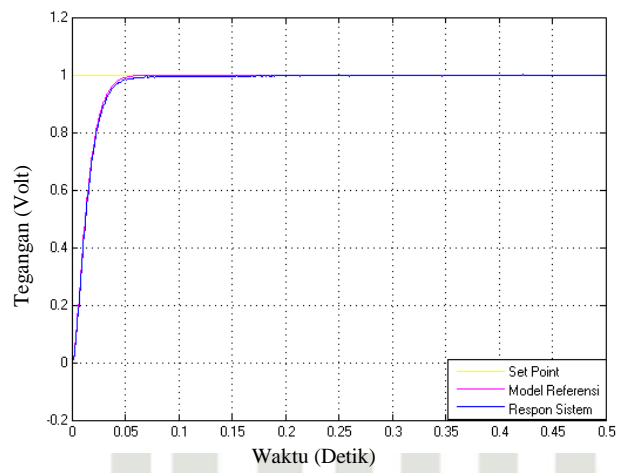
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

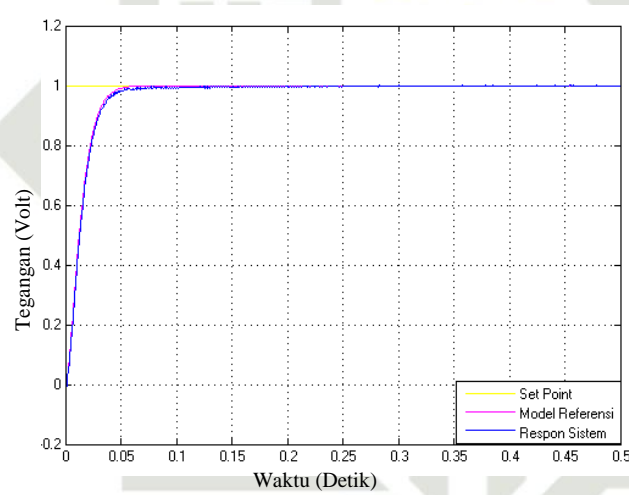
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

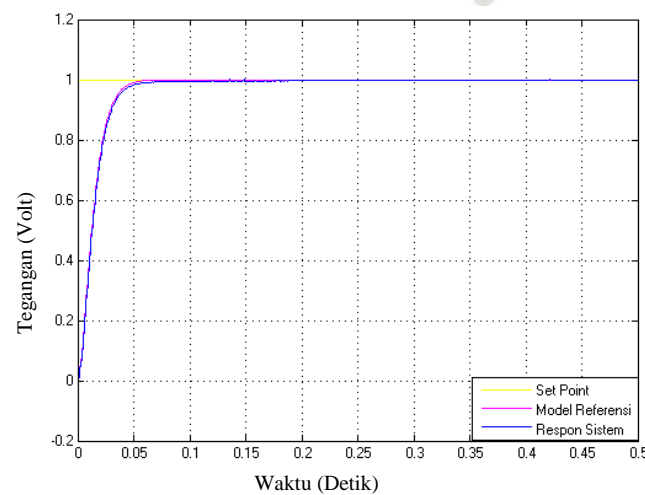
7. Hasil Simulasi Pengendali MRAC-Fuzzy dengan $\gamma = 35$, $e = [-0.125 \ 0 \ 0.125]$, $De = [-0.2 \ 0 \ 0.2]$ dan $u = [-0.125 \ 0 \ 0.125]$



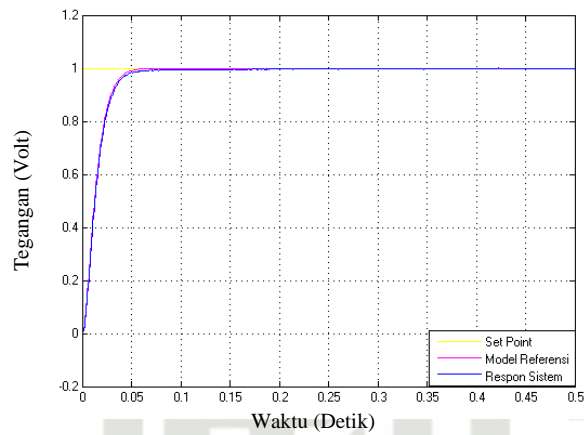
8. Hasil Simulasi Pengendali MRAC-Fuzzy dengan $\gamma = 35$, $e = [-0.2 \ 0 \ 0.2]$, $De = [-0.15 \ 0 \ 0.15]$ dan $u = [-0.12 \ 0 \ 0.12]$



9. Hasil Simulasi Pengendali MRAC-Fuzzy dengan $\gamma = 35$, $e = [-0.15 \ 0 \ 0.15]$, $De = [-0.25 \ 0 \ 0.25]$ dan $u = [-0.1 \ 0 \ 0.1]$

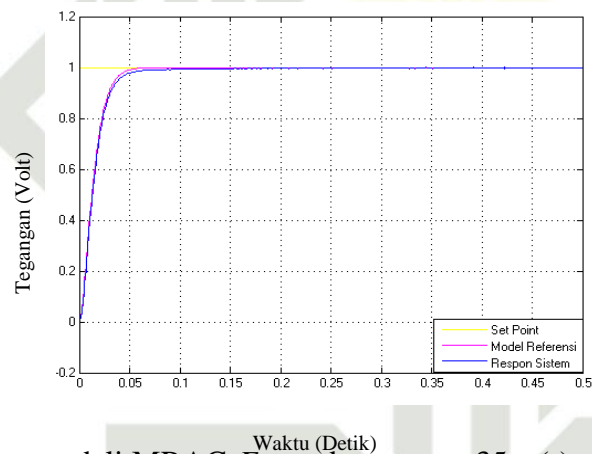


10. Hasil Simulasi Pengendali MRAC-Fuzzy dengan $\gamma = [-0.2 \ 0 \ 0.2]$, $De = [-0.3 \ 0 \ 0.3]$ dan $u = [-0.125 \ 0 \ 0.125]$

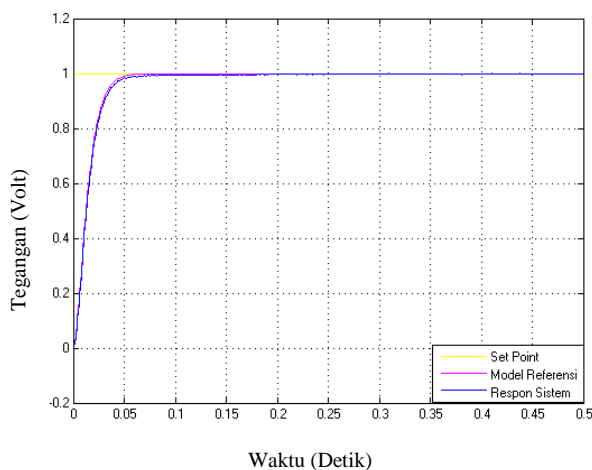


B. Proses Menentukan Lebar Fungsi Keanggotaan $e(-), e(+)$ $De(-), De(+)$ K dan B

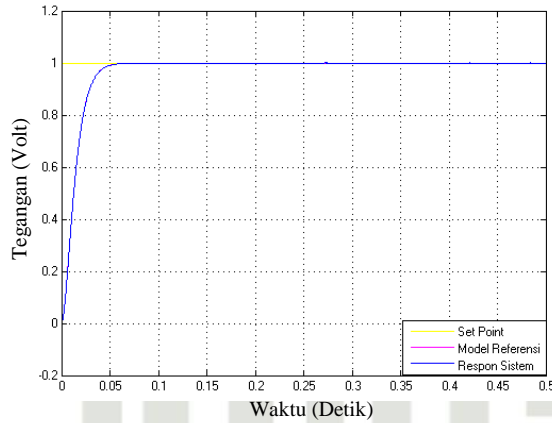
1. Hasil Simulasi Pengendali MRAC-Fuzzy dengan $\gamma = 35$, $e(-) = [-1 \ -1 \ -0.2 \ 0]$, $e(+) = [0 \ 0.2 \ 1 \ 1]$ $De(-) = [-1 \ -1 \ -0.4 \ 0]$, $De(+) = [0 \ 0.4 \ 1 \ 1]$, $K = [-1 \ -1 \ -0.2 \ 0]$, $B = [0 \ 0.2 \ 1 \ 1]$



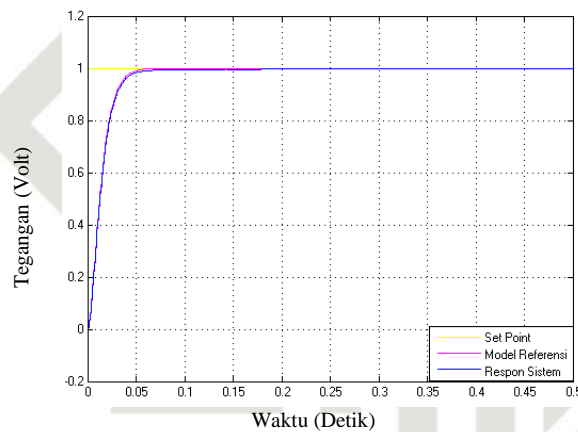
2. Hasil Simulasi Pengendali MRAC-Fuzzy dengan $\gamma = 35$, $e(-) = [-1 \ -1 \ -0.15 \ 0]$, $e(+) = [0 \ 0.15 \ 1 \ 1]$ $De(-) = [-1 \ -1 \ -0.3 \ 0]$, $De(+) = [0 \ 0.3 \ 1 \ 1]$, $K = [-1 \ -1 \ -0.125 \ 0]$, $B = [0 \ 0.125 \ 1 \ 1]$



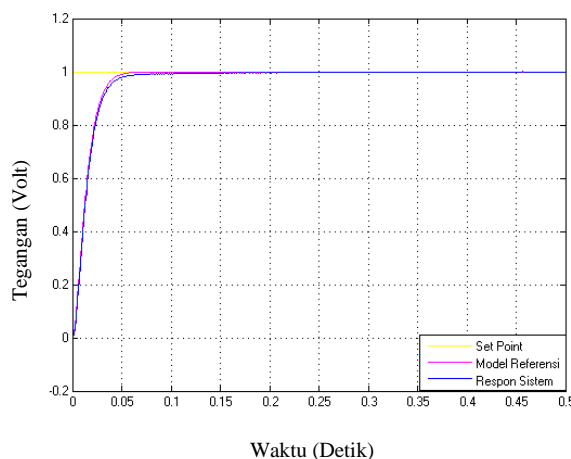
3. Hasil Simulasi Pengendali MRAC-Fuzzy dengan $\gamma = 35$, $e(-) = [-1 \ -1 \ -0,1 \ 0]$, $e(+) = [0 \ 0,1 \ 1 \ 1]$ $De(-) = [-1 \ -1 \ -0,45 \ 0]$, $De(+) = [0 \ 0,45 \ 1 \ 1]$, $K = [-1 \ -1 \ -0,125 \ 0]$, $B = [0 \ 0,125 \ 1 \ 1]$



4. Hasil Simulasi Pengendali MRAC-Fuzzy dengan $\gamma = 35$, $e(-) = [-1 \ -1 \ -0,1 \ 0]$, $e(+) = [0 \ 0,1 \ 1 \ 1]$ $De(-) = [-1 \ -1 \ -0,3 \ 0]$, $De(+) = [0 \ 0,3 \ 1 \ 1]$, $K = [-1 \ -1 \ -0,2 \ 0]$, $B = [0 \ 0,2 \ 1 \ 1]$



5. Hasil Simulasi Pengendali MRAC-Fuzzy dengan $\gamma = 35$, $e(-) = [-1 \ -1 \ -0,25 \ 0]$, $e(+) = [0 \ 0,25 \ 1 \ 1]$ $De(-) = [-1 \ -1 \ -0,2 \ 0]$, $De(+) = [0 \ 0,2 \ 1 \ 1]$, $K = [-1 \ -1 \ -0,125 \ 0]$, $B = [0 \ 0,125 \ 1 \ 1]$



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Diarangi mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Akbar Dimansyah Harahap lahir pada tanggal 11 Mei 1998 sebagai anak keempat dari Bapak Soleh Ibrahim Harahap dan Ibu Painam, S.Pd dengan jumlah saudara sebanyak 6 saudara. Beralamat di Dusun Sukajadi Desa Sabungan Kecamatan Sungai Kanan, Kabupaten Labuhanbatu Selatan, Sumatera Utara. Penulis menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 114364 Sabungan dan lulus pada tahun 2010, kemudian melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 1 Sei Kanan dan lulus pada tahun 2013, selanjutnya melanjutkan pendidikan ke Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Sei Kanan. Pada saat penulis duduk di kelas 1 SMA, penulis ikut Organisasi Praja Muda Karana (Pramuka) pada tahun 2013 dan menjadi ketua Pramuka SMAN 1 Sei Kanan pada Tahun 2015. Kemudian setelah lulus SMA pada tahun 2016 penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau dengan Program Studi Teknik Elektro. Saat kuliah aktif di Organisasi Pramuka UIN Suska Riau, pada semester 5 penulis mengambil konsentrasi Elektronika Instrumentasi dan lulus pada tahun 2021.

Dengan karunia Allah SWT, ketekunan serta rasa motivasi yang tinggi untuk terus belajar dan berusaha, penulis telah berhasil menyelesaikan tugas akhir ini. Semoga dengan penulisan tugas akhir ini mampu memberikan manfaat dan kontribusi untuk siapa saja yang membutuhkannya.

Akhir kata penulis mengucapkan rasa syukur yang sebesar-besarnya kepada Allah SWT atas terselesaikannya tugas akhir yang berjudul “**Pengendali Kecepatan Motor**

Brushless DC Menggunakan Kendali Hybrid Model Reference Adaptive Control (MRAC)-Fuzzy”

No. HP : 082277447696

Email : akbarharahap7007@gmail.com

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
2. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
3. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
4. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.